

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Evaluación de antena parche a 77 GHz en presencia de un radomo



Grado en Ingeniería
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Julen Izkue Marcos

Iñigo Ederra Urzainqui

Pamplona, 25 de enero de 2019

Abstract

The present assay has been carried out in order to design the antenna of a radar short-range detection system for use in the automotive industry.

As the need to provide greater safety as regards the automotive industry is ever more pressing, it is necessary to have greater control over the environment. As a result of this need, there is currently a large investment in R & D & I in the field of autonomous driving and, therefore, connectivity between vehicles.

For such connectivity, systems are needed that capture information from the environment through antennas. These antennas can be of various types, although the most commonly used are patch antennas such as those in this document. In this way, in this final assay, the design, characterization and behavior of the functionality of a 77GHz patch antenna will be performed in the presence of a dielectric (ABS).

Resumen

El presente trabajo fin de estudios se ha llevado a cabo a fin de diseñar la antena de un sistema radar de detección de corto alcance para su empleo en la industria automovilística.

Siendo cada vez más acuciante la necesidad de procurar una mayor seguridad en lo que a automoción se refiere, es necesario tener un mayor control sobre el entorno. A raíz de esta necesidad hay, actualmente, una gran inversión en I+D+I en el campo de la conducción autónoma y, por ende, de la conectividad entre vehículos.

Para dicha conectividad se precisan de sistemas que capten información del entorno a través de antenas. Estas antenas pueden ser de diversos tipos, aunque las más utilizadas son antenas planas como las del presente documento. De tal modo, en este trabajo fin de estudios se va a realizar el diseño, la caracterización y el comportamiento de la funcionalidad de una antena parche a 77GHz en presencia de un material dieléctrico que simule el parachoques de un vehículo.

Palabras clave

- HFSS
- Antena parche
- Línea microstrip
- MATLAB
- ABS

ÍNDICE

Abstract	3
Resumen.....	4
Palabras clave.....	5
Introducción al trabajo.....	8
Motivación del trabajo	8
Objetivo del trabajo	8
Línea de trabajo.....	9
1.- Marco teórico.....	10
1.1.- Introducción	10
1.2.- Marco histórico	10
1.3.- Características generales	10
1.3.1.- Componentes básicos	10
1.3.2.- Geometría	11
1.3.3.- Alimentación	11
1.3.4.- Antenas parche de geometría rectangular con alimentación mediante línea microstrip	12
2.- Diseño teórico	14
2.1.- Introducción	14
2.2.- Desarrollo	14
2.3.- Cálculos	14
3.- Diseño simulado.....	16
3.1.- Introducción	16
3.2.- Desarrollo.....	16
3.2.1.- Elementos del diseño	16
3.3.- Simulación	17
4.- Caracterización de la respuesta de la antena en presencia de ABS.....	22
4.1.- Introducción	22
4.2.- Simulaciones	23
4.2.1.- Conclusiones	27
4.3.- Simulación aumentando el tamaño plano de masa.....	36
4.3.1.- Conclusiones	39
5.- Caracterización de la respuesta de la antena en presencia de un parachoques de ABS.....	48
5.1.- Introducción	48
5.2.- Simulación	50
5.2.1.- Simulación a 15mm	52

5.2.2.- Simulación a 10mm	54
5.2.3.- Simulación a 10mm con plano de masa infinito	57
5.3.- Conclusiones	60
5.3.1.- Diagramas de radiación obtenidos	61
5.3.2.- Plano E.....	62
5.3.3.- Plano H	64
6.- Conclusión.....	65
7.- Líneas futuras	69
Anexos	70
Anexo1. Código MATLAB.....	70
Anexo2. Datasheet RO4353B	70
Índice de Figuras y Tablas.....	71
Bibliografía	74

Introducción al trabajo

Motivación del trabajo

La ingente cantidad de automóviles en la actualidad, sumada a la previsión de un mayor parque móvil en las próximas décadas, ha dado lugar a una creciente campaña de investigación en torno a la conectividad entre vehículos. Estas investigaciones se centran en lograr que, autónomamente, el vehículo sea capaz de percibir el medio que lo rodea. De esta forma es posible evitar accidentes por causa humana, como puede ser una distracción. Esto es posible gracias a sistemas radar de corto alcance.

Ya desde la década de los 60 se lleva a investigando a cerca de los radares de automoción, aunque no es hasta la última década del siglo XX que se llevan al mercado sistemas operativos. En un principio los sistemas radar se implementaban en frecuencias de microondas, con elevados costos (en torno a decenas de miles de dólares). Con el tiempo los sistemas fueron avanzando en pos de un mejor funcionamiento y un abaratamiento, llegando a frecuencias milimétricas con costes de tan sólo decenas de dólares [1].

Estos primeros sistemas operaban en frecuencias tanto de 24GHz, como de 76.5GHz.

En la actualidad, los sistemas radar de corto alcance operan en las bandas de 77 a 81 GHz y de 21.65 a 26.65 GHz, recogidas y reguladas en la Directiva 98/34/CE del Parlamento Europeo [2].

Objetivo del trabajo

El objetivo general de este trabajo fin de estudios, es el diseño y caracterización del comportamiento de una antena parche a frecuencia de 77GHz, frente al parachoques de un automóvil. Esto se llevará a cabo mediante la simulación del comportamiento de dicha antena.

El software de simulación HFSS de Ansys es un elemento clave en la resolución del escenario planteado. HFSS es un solucionador comercial de estructuras electromagnéticas, mediante el método de los elementos finitos (Finite Element Method) [0]. Esto quiere decir que aproxima soluciones de ecuaciones diferenciales parciales complejas.

Línea de trabajo

La línea de trabajo a seguir se realizó a fin de facilitar la consecución del proyecto:

- Diseño de la antena, empezando por un diseño puramente teórico.
- Caracterización de la respuesta de la antena frente a una plancha de ABS.
- Caracterización de la antena frente a un parachoques de ABS.

1.- Marco teórico

1.1.- Introducción

En este apartado se va a tratar el marco teórico de las antenas parche, poniendo especial énfasis en las antenas parche de geometría rectangular alimentadas mediante una línea de microstrip.

En primer lugar, se va a tratar el marco histórico de las tecnologías microstrip usadas para la fabricación de antenas. En segundo lugar, se van a tratar las características generales de este tipo de antenas, como son sus posibles geometrías o su método de alimentación. Por último, se va a profundizar en el comportamiento de una antena parche de geometría rectangular con alimentación mediante línea microstrip.

1.2.- Marco histórico

En la década de los 50 ya se presentó la tecnología microstrip, aunque no fue hasta dos décadas después que apareció el primer artículo académico usando dicha tecnología para la fabricación de antenas. El primer artículo en el cual se proponía esta utilización fue *"Microstrip Antennas"*, de J. Howell [3]. Dicho artículo tuvo gran acogida entre la comunidad científica, debido a la necesidad de antenas cada vez más compactas y ligeras que operaran en frecuencias de microondas.

Desde finales del siglo XX se ha ido investigando y desarrollando cada vez más el campo de las antenas basadas en tecnologías microstrip, como pueden ser las antenas parche.

1.3.- Características generales

1.3.1.- Componentes básicos

Las antenas parche son aquellas antenas que proceden de tecnologías microstrip, pero que no tienen por qué ser antenas microstrip. Las antenas microstrip son aquellas antenas parche alimentadas mediante una línea microstrip. En cambio, las antenas parche pueden tener diversas alimentaciones.

Dicho esto, una antena parche debe poseer como mínimo tres componentes:

- Plano de masa.
- Sustrato dieléctrico.
- Un elemento radiante.

En cuanto al sustrato dieléctrico cabe resaltar que tiene un espesor del orden de 2 a 4 magnitudes menos que la longitud de onda (λ) y una constante dieléctrica (ϵ_r) comprendida entre 2 y 12 normalmente. El elemento radiante debe tener una longitud comparable a la longitud de onda.

1.3.2.- Geometría

Existen diversas geometrías para los radiadores, siendo las más comunes rectangulares y circulares. Aunque también existen otros tipos, como se puede ver en la figura 1, este trabajo se centrará en la geometría rectangular.

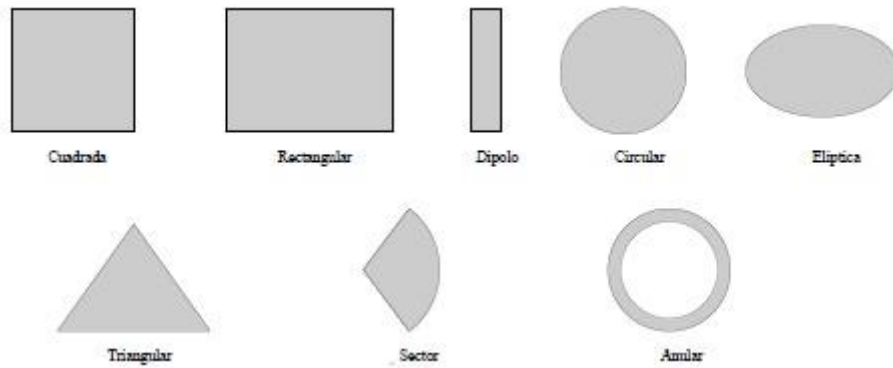


Figura 1: Diversas geometrías de antenas parche [4]

1.3.3.- Alimentación

Para la alimentación de las antenas, también hay diversidad de opciones:

- Línea microstrip.
- Sondas coaxiales.
- Ranuras.
- Acoplamiento de cavidades.

No obstante, los métodos más comunes son mediante una línea impresa o una sonda coaxial. El primer escenario (figura 3), permite alimentar la antena sobre el mismo sustrato. Esto requiere de una adaptación de impedancias, ya sea mediante un adaptador $\lambda/4$ o a través de un receso. Por su parte, la alimentación mediante una sonda coaxial requiere atravesar el sustrato desde el plano de masa a fin de adaptar directamente el coaxial (figura 2). Este método es preferible en antenas poco directivas, por lo cual se descartó rápidamente en el desarrollo de este trabajo.

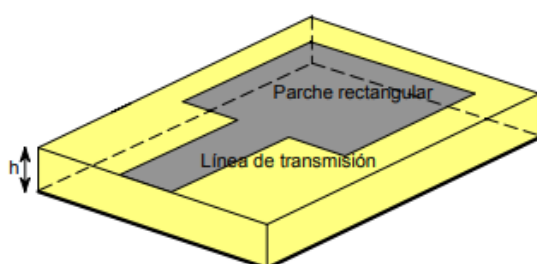


Figura 3: Alimentación mediante línea microstrip [4].

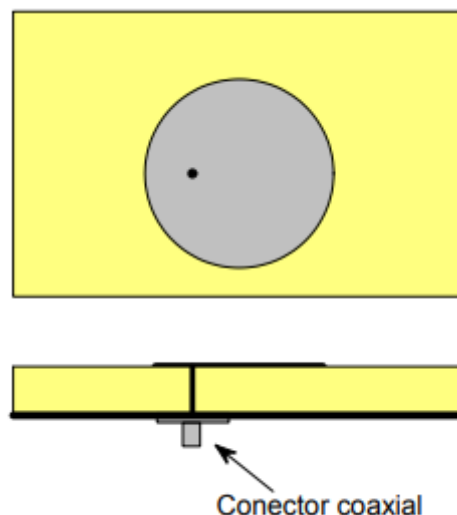


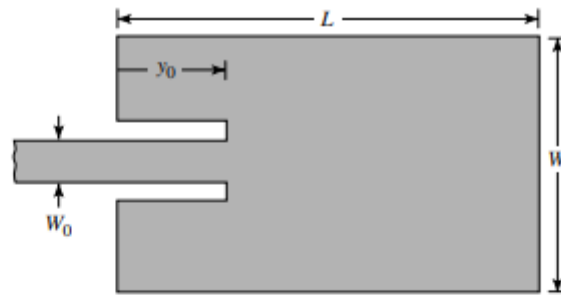
Figura 2: Alimentación mediante sonda coaxial [4].

1.3.4.- Antenas parche de geometría rectangular con alimentación mediante línea microstrip

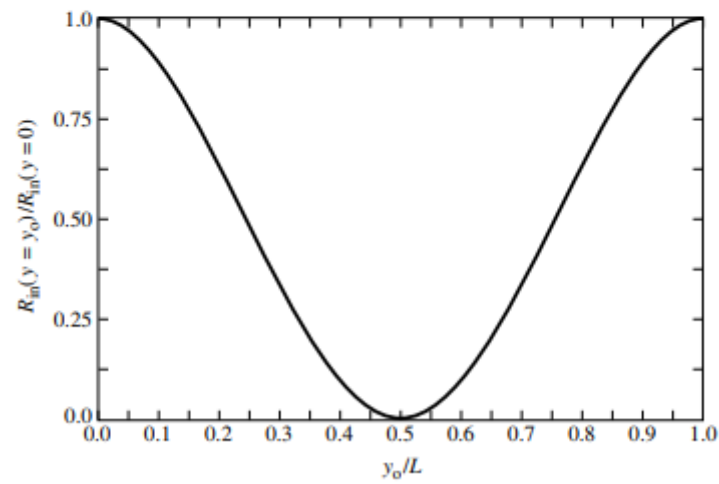
En este subapartado del marco teórico, se van a tratar diversas consideraciones sobre la antena que se va a utilizar en la realización de este trabajo fin de estudios.

En primer lugar, como el propio nombre del subapartado indica, se trata de una antena parche de geometría rectangular y con alimentación mediante línea microstrip. Se ha escogido este tipo de geometría y alimentación puesto que es más simple el diseño teórico y esto ayudaría al correcto desarrollo del trabajo.

Para la adaptación de la impedancia de la línea microstrip con la impedancia del parche se debe valorar que la impedancia que ve la superficie del parche no es constante (figura 4. b). Debido a esto se ha decidido utilizar la técnica del receso, lo cual permite alimentar la antena en un punto intermedio de su superficie, estando este perfectamente adaptado a la línea de alimentación. El receso consiste en recortar una pequeña superficie del parche, para así poder introducir en un punto intermedio del parche la línea de alimentación a utilizar (figura 4. a).



(a) Recessed microstrip-line feed



(b) Normalized input resistance

Figura 4: Esquema de parche microstrip con receso (arriba (a)), e impedancia normalizada del parche en función de la posición (abajo (b)) [5].

2.- Diseño teórico

2.1.- Introducción

Antes de realizar un diseño práctico, se debe hacer un diseño teórico preliminar. Este diseño se realiza a fin de conseguir una aproximación del diseño que se desea realizar en última instancia (con más o menos precisión dependiendo del modelo utilizado).

2.2.- Desarrollo

Para el diseño teórico de esta antena parche a 77GHz, sea tomado como referencia un trabajo titulado "*Design of a Microstrip Patch Antenna* [6]. En dicho trabajo, queda patente como diseñar una antena parche a 24GHz, empezando por un diseño teórico y acabando con su simulación con el software de Ansys HFSS (Release 19.2.0).

2.3.- Cálculos

Las fórmulas empíricas en las cuales se apoya y, por ende, en las cuales se ha basado esta parte del trabajo son las que siguen:

$$W_{patch} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left(1 + \frac{12h}{W_{patch}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\Delta L = \frac{0.412h \left((\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W_{patch}}{h} + 0.264 \right) \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W_{patch}}{h} + 0.8 \right)}$$

$$L_{patch} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L$$

$$R_{edge} = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_{r-1}} \left(\frac{L}{W} \right)^2$$

$$d = \frac{L_{patch} \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{R_{in}}{R_{edge}}} \right)}{\pi}$$

Donde:

- f_r es la frecuencia de trabajo a la que se ha diseñado la antena, en este caso 77GHz.
- ε_r es la constante dieléctrica relativa del medio, en este caso Rogers 4350B. Los materiales de esta clase son hidrocarburos reforzados con fibra de vidrio con rendimiento eléctrico cercano al PTFE (teflón).
- h es el espesor del sustrato, de una centésima parte de pulgada (0.254mm) para el Rogers 4350B.

Para el cálculo de los siguientes parámetros, se ha creado un script en Matlab (Anexo 1) para de esta forma evitar los posibles errores humanos.

- W_{patch} es la anchura de la antena parche, calculada a través de estas fórmulas empíricas como 1.2762 milímetros.
- ε_{reff} es la constante dieléctrica efectiva del medio, que con los datos anteriores se ha determinado como 3.0525.
- ΔL , es un parámetro que relaciona las dimensiones y la constante dieléctrica efectiva del medio para poder calcular a partir de ahí la longitud de la antena. Se ha calculado como 0.1140 milímetros como el valor de este parámetro.
- L_{patch} es el largo de la antena, cuyo valor corresponde a 0.8870 milímetros en este diseño.
- R_{edge} es la resistencia de borde del parche. Es decir, la resistencia que se ve en el borde de la antena, pues esta va variando con respecto a la distancia del límite del parche. Esta resistencia vale 218.9435 Ω , y es un parámetro clave a la hora de calcular el receso.
- R_{in} es la resistencia de la línea microstrip, la cual se ha utilizado como en el artículo [6]: 100.6 Ω . De esta forma se ha podido utilizar el mismo ancho de la línea que en dicho artículo, 0.1046 milímetros.
- d es el receso. El receso es el punto en el cual el parche ve la misma impedancia que la línea, de forma que se podría acoplar perfectamente adaptada. Esto se debe a que, como ya se vio en el apartado 1, la impedancia del parche va variando de más a menos en su superficie, siendo mayor en los bordes y menor en el interior. De esta forma se evita la necesidad de poner un adaptador entre la antena y la línea microstrip para evitar reflexiones. A través de las fórmulas anteriores se ha determinado un receso de 0.2332 milímetros.

3.- Diseño simulado

3.1.- Introducción

Para la segunda parte del diseño, la simulación, se ha utilizado un software especializado en resolución de problemas para estructuras electromagnéticas: HFSS de Ansys (Release 19.2.0).

Este software ofrece gran versatilidad a la hora de diseñar y resolver escenarios electromagnéticamente complejos, lo cual permita realizar de forma más rápida y sencilla el estudio del escenario en cuestión.

3.2.- Desarrollo

En primer lugar, se deben dibujar el esquemático del sistema a resolver. Para ello se crean las formas deseadas y se le asigna un tamaño y propiedades concretas.

Este diseño constará de seis elementos: un sustrato, un puerto, una línea de alimentación, el propio parche, un plano de masa y aire.

3.2.1.- Elementos del diseño

- Sustrato. Se trata de un sustrato de material Rogers RO4350B. Este material es un hidrocarburo reforzado con vidrio, con un rendimiento eléctrico cercano al PTFE y de sencilla fabricación (Anexo 2.) Sus dimensiones son 6x7x0.254 mm (ancho (eje x), largo (eje y) y alto (eje z)). Estas dimensiones han sido definidas de tal forma que la capa superior del sustrato, al igual que el centro del plano XY se hallen en el origen de coordenadas (0,0,0).
- Puerto. Se trata de un puerto de alimentación, que a través de la línea microstrip llega hasta el parche. Siendo precisos llega hasta el punto exacto del parche en el cual su impedancia está adaptada a 100Ω (a través del receso). Se ha definida la excitación en este puerto como “Wave port”.
- Línea de alimentación. Ha sido creada como un conductor eléctrico perfecto, la cual implica que, al tomarse como un elemento ideal, no presenta ningún tipo de pérdidas en la alimentación de la antena. Esto permitía que, en primera instancia se diseñara de tal forma que solapase con el parche. Una vez hallado su valor definitivo, esta situación es subsanada (apartado 3.3). Esto se aprecia en la figura 6.
- Parche microstrip. Se trata de una antena parche definida como un conductor eléctrico perfecto, lo cual permite realizar de forma más simple las primeras

soluciones al problema. Este parche tiene unas dimensiones precisas, calculadas en el apartado 2.3, las cuales vienen definidas por una longitud (L_{patch}) y un ancho (W_{patch}). De estos valores también depende el receso, amén de su impedancia de borde (la impedancia que la antena presenta en sus límites).

- Plano de masa. Se trata de un plano de masa, el cual permite generar una diferencia de potencial que se traduce en un campo eléctrico y su consiguiente campo magnético. Las dimensiones del plano se han escogido idénticas a las del dieléctrico (RO4350B [7]).
- Aire. Se trata de un espacio de aire el cual hay que definir para poder simular correctamente el diseño, puesto que si este plano no estuviera la simulación no podría llevarse a cabo. El cubo de aire definido tiene una longitud suficientemente grande como para poder contener el resto de los elementos de la simulación (10x10x4 mm). Puesto que el diagrama de radiación de un parche se produce perpendicular a su superficie, a fin de obtener mejores simulaciones, se ha mallado tan solo la cara superior del aire. Este mallado se ha definido con mallas de 1.5mm, las cuales no son superiores a media longitud de onda, aproximadamente 1.95mm.

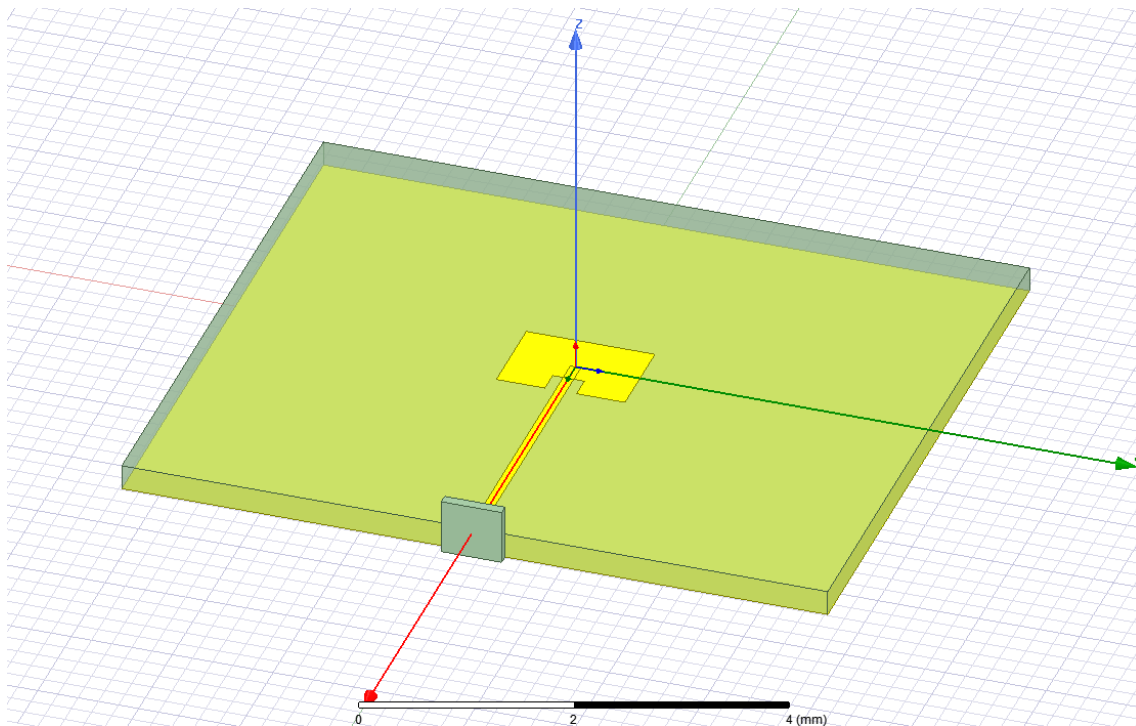


Figura 5: Diseño de la antena parche en HFSS.

3.3.- Simulación

Una vez creado el modelo a simular, se realiza la simulación con los valores del diseño teórico, haciendo un barrido de 74 GHz a 80 GHz, con 201 puntos. Esto quiere decir que cada 0.03 GHz (30MHz) será resuelto el escenario. Para que las simulaciones

no dependen del número de iteraciones que realiza el software, se ha utilizado en todas las simulaciones el mismo número máximo de pasos (12) y la misma delta de S máxima (0.02). Además, se ha mallado de forma más precisa la cara superior del aire, dando de esta forma una mejor resolución. Este mallado se ha realizado de tal forma que las mallas a resolver sean en última instancia menores que la longitud de onda. Dicho procedimiento se realiza a fin de ser más preciso el resultado obtenido en la dirección de máxima radiación de la antena.

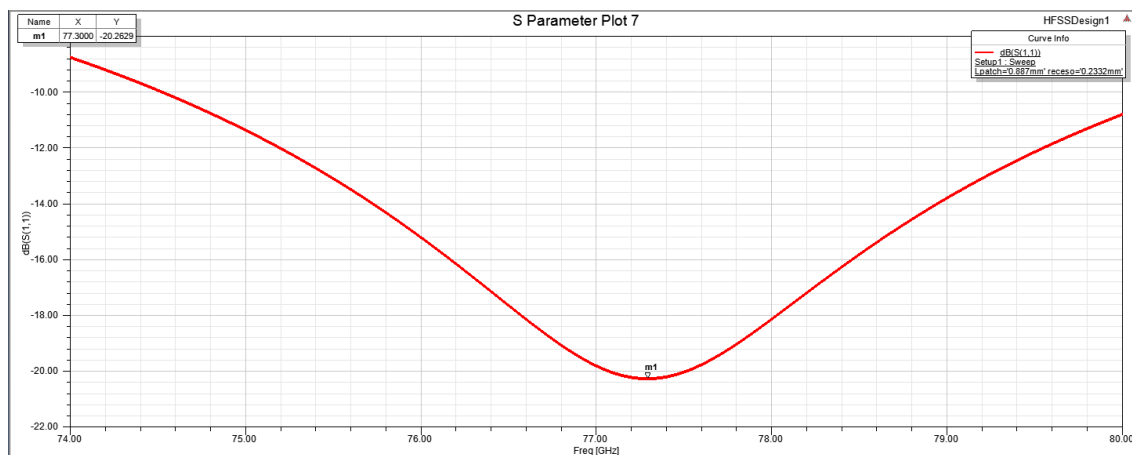


Figura 6: Respuesta en frecuencia del primer intento de adaptación de la antena a 77 GHz.

Como se puede apreciar en la figura 6, la frecuencia central de la antena diseñada se encuentra en 77.3 GHz. Esto se debe a que, al ser un diseño teórico basado en fórmulas puramente empíricas, siempre va a haber algún error derivado del método de obtención de dichas fórmulas.

Para conseguir centrar la respuesta de la antena en 77 GHz, se realiza una primera aproximación de la longitud del parche (L_{patch}). Teniendo en cuenta que la longitud del parche a 77.3 GHz es 0.887 mm, se calcula la diferencia de tamaño que debería tener a 77 GHz aproximadamente mediante un factor de conversión, dando de este modo una longitud del parche de 3.4 μ m. Teniendo en cuenta que lo que se desea es bajar en frecuencia la respuesta de la antena, la longitud del parche debe ser mayor puesto que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, así que a mayor longitud del parche, funciona a mayor longitud de onda y por lo tanto a menor frecuencia. Con esto, se determina que la longitud del parche debe estar en torno a 0.8904 mm.

A la vista de este valor de L_{patch} , se determina que la longitud del parche debe ser 0.8904 mm y se decide variar el receso a fin de adaptar de forma adecuada la antena. Dado que el valor teórico del receso es de 0.2332 mm, se realiza un barrido paramétrico con el software HFSS cambiando el receso de 0.233 mm hasta 0.2333 mm en intervalos de 0.00025 mm. Con este método se deduce que, en el lugar donde la respuesta de la antena tenga menores pérdidas se encontrará la mejor adaptación.

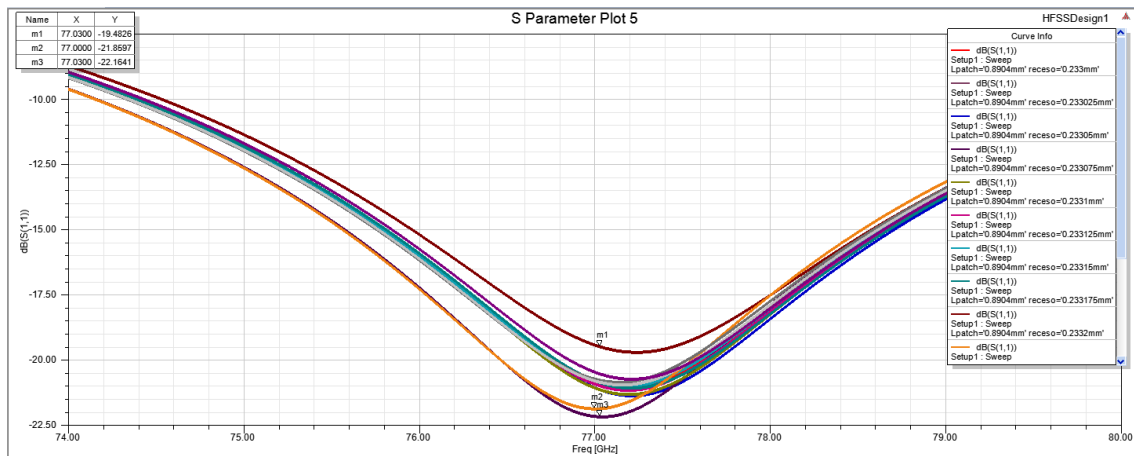


Figura 7: Barrido para diferentes valores del receso en busca de una buena adaptación a 77 GHz.

Finalmente se precisa la longitud del parche como 0.8904 mm con un receso de 0.223325 mm, quedando la respuesta del parche (S_{11}) centrada en 77 GHz. Adicionalmente, esta respuesta tiene baja reflexión, tratándose tan solo de -21.8597 dB.

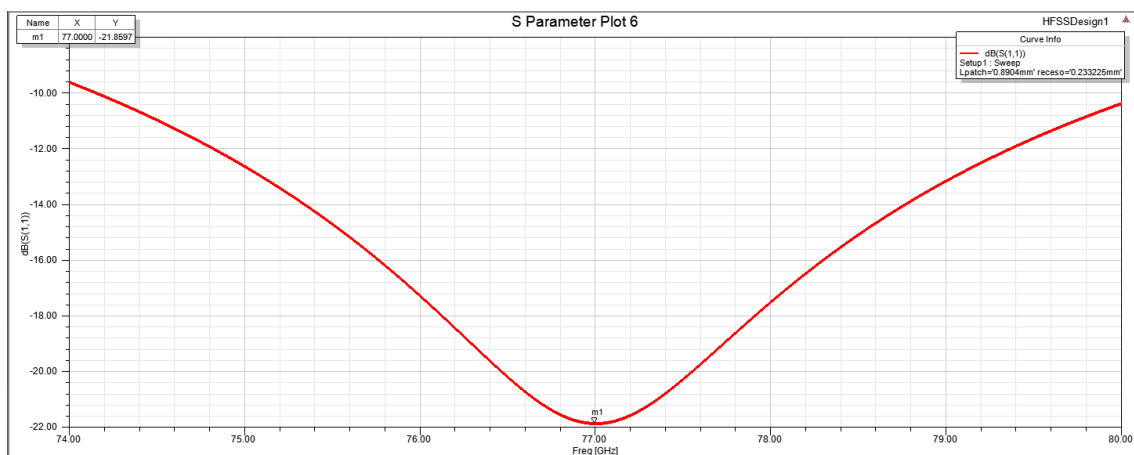


Figura 8: Respuesta de la antena a 77 GHz una vez ajustados el receso y la longitud del parche.

En la figura 8, se puede apreciar el resultado final de la simulación en busca de la mejor adaptación posible a la frecuencia de operación de la antena ya diseñada.

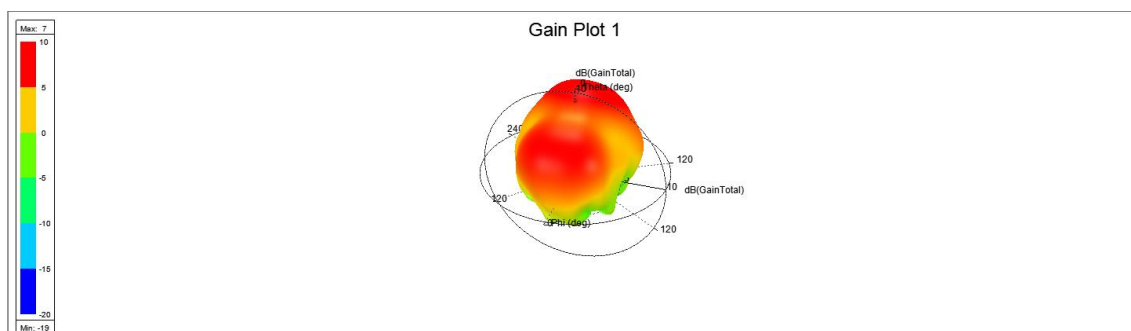


Figura 9: Diagrama de radiación de la antena a 77 GHz.

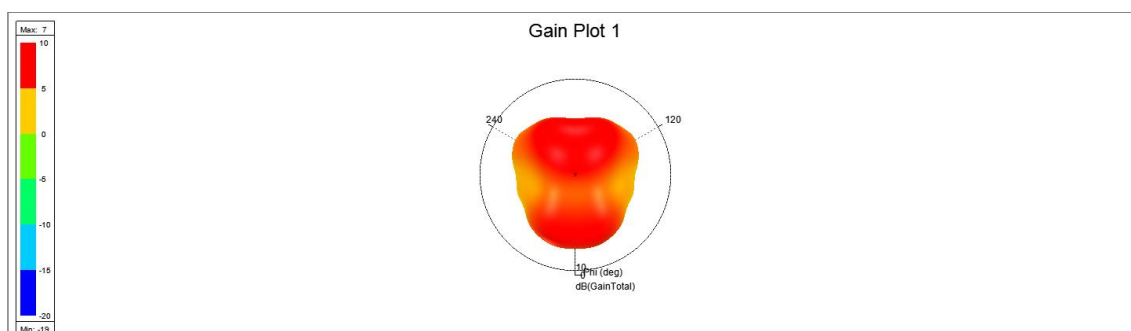


Figura 10: Diagrama de radiación de la antena a 77 GHz, visto el plano ϕ .

En las figuras 9 y 10, se aprecia el diagrama de radiación de la antena, tanto de forma tridimensional (donde se puede observar que prácticamente no tiene lóbulo trasero), como el eje ϕ .

Por último, antes de pasar al siguiente apartado, se ha realizado otro ajuste. Puesto que todo el esquemático es simétrico con respecto al eje X, se ha dividido el problema haciendo un Split en el plano ZX y se ha añadido un “Symmetry Boundary” plano H. Se hace con respecto al plano H pues es este el que presenta simetría en el plano ZX (corte plano E, figura 11).

El haber realizado esta división permite que la simulación se realice a mayor velocidad puesto que solamente calcula la mitad de los puntos y asume que sus simétricos van a resultar idénticos. El objetivo de este último punto del apartado es tan

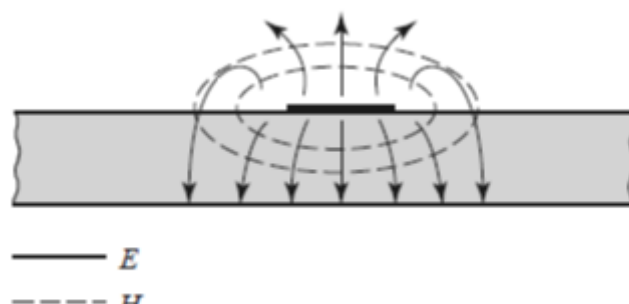


Figura 11: Campos E y H producidos por la diferencia de potencial entre el parche y el plano de masa [7].

solo conseguir una menor carga computacional para el ordenador, lo que se traduce en mayor velocidad de procesamiento.

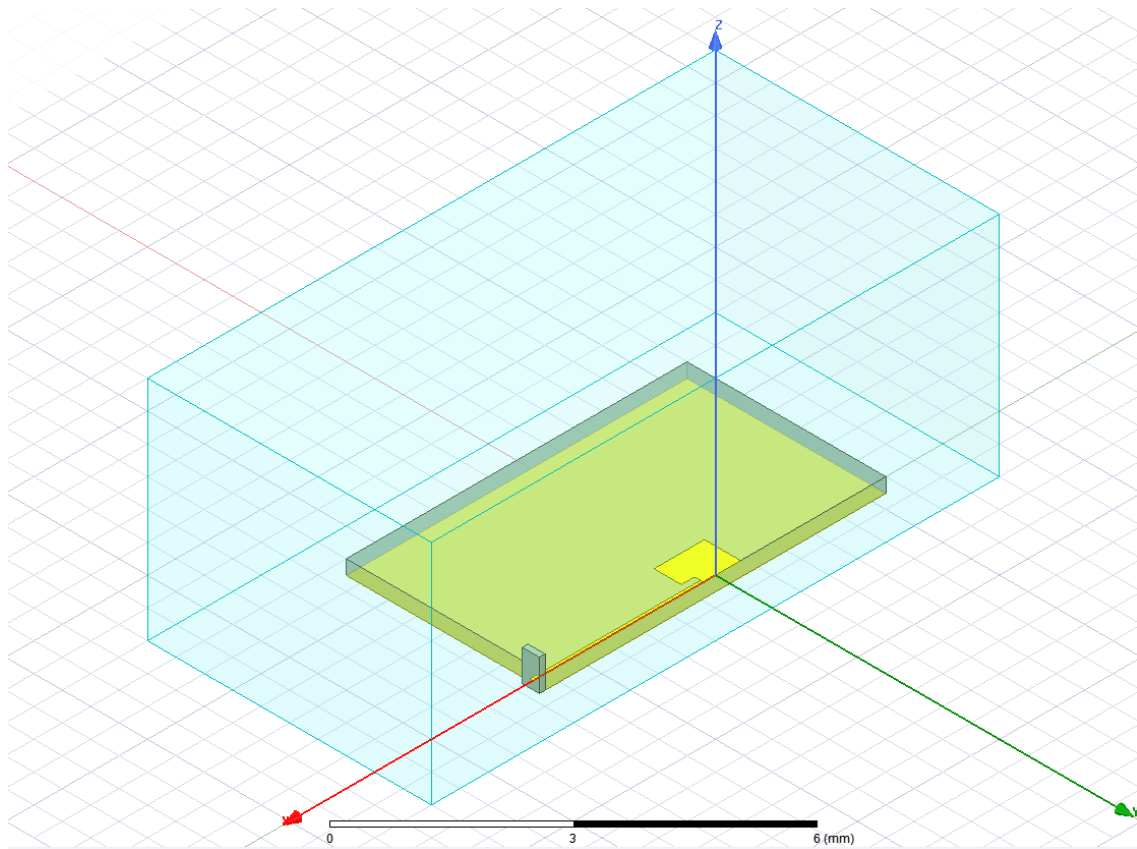


Figura 12: Diseño de la antena parche dividido el modelo según el eje X, en HFSS.

Puesto que se trata de la misma simulación, el resultado es el mismo. Esto se aprecia en la siguiente figura (figura 13).

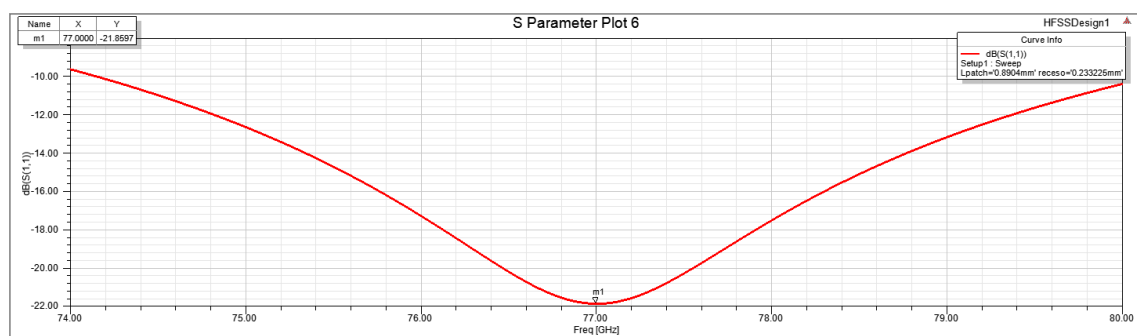


Figura 13: Respuesta de la antena a 77 GHz, según el modelo partido.

4.- Caracterización de la respuesta de la antena en presencia de ABS

4.1.- Introducción

En este apartado se tratará cómo se comporta el parche previamente diseñado en el apartado 3 en presencia de una plancha de ABS. Puesto que la antena será utilizada detrás del parachoques de un vehículo, debe comprobarse su funcionamiento en presencia de un dieléctrico que suele usarse en la mayoría de los automóviles, en este caso el ABS. El ABS (acrilonitrilo butadieno estireno, ABS por sus siglas en inglés) es un plástico muy utilizado en automoción debido a su resistencia a impactos y que a temperaturas relativamente altas se puede deformar permitiendo de esta forma darle la forma deseada. Puesto que HFSS no tiene caracterizado el ABS, ha sido necesario introducir manualmente tanto su tangente de pérdidas (0.01), como su constante dieléctrica (2.8) y su densidad (1260 g/mm^3).

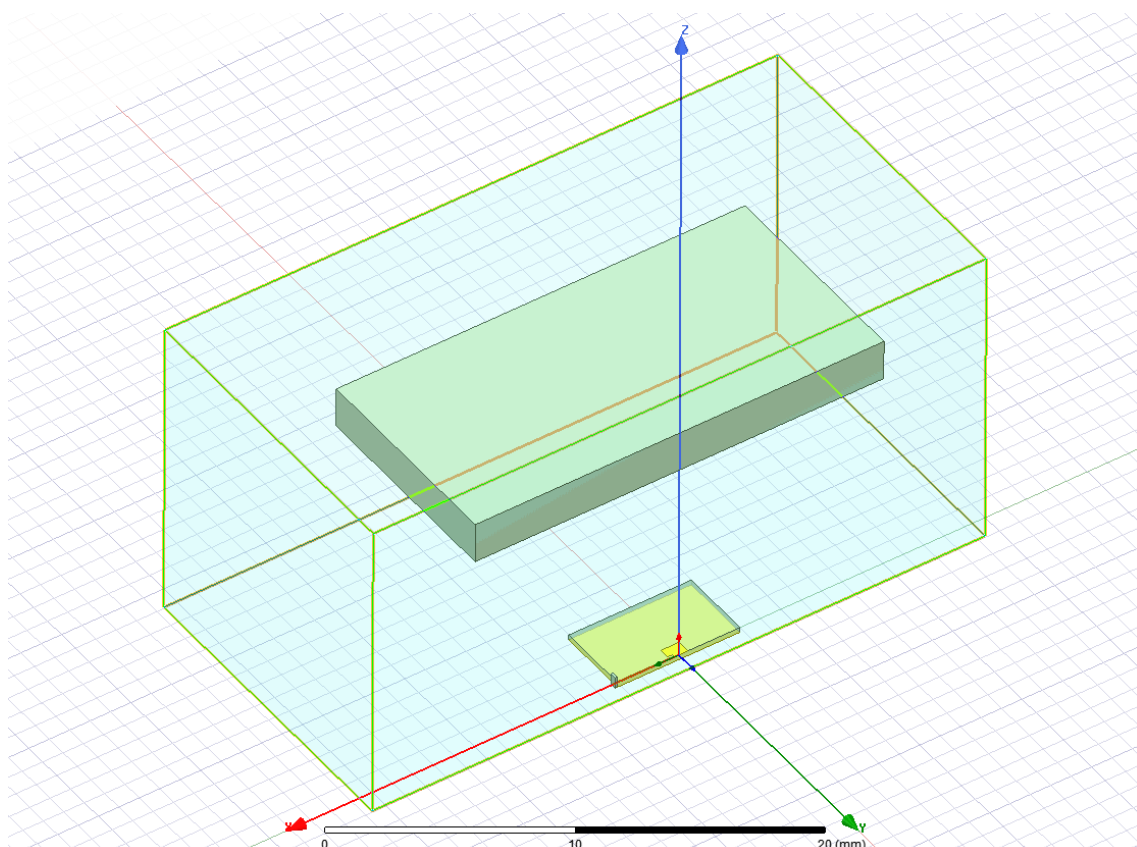


Figura 14: Antena junto a dieléctrico en HFSS.

Para comprobar el comportamiento de la antena frente a este material, se realizan diferentes simulaciones variando tanto el grosor del ABS como la distancia de

éste a la antena. La finalidad de las diversas simulaciones será determinar cuál es la mejor distancia para cada grosor del ABS planteado, dando así una idea de cómo debería acoplarse en el interior del vehículo una vez finalizado el estudio. A parte, también permitiría conocer datos como las pérdidas asociadas al dieléctrico o el efecto de las reflexiones.

4.2.- Simulaciones

Las simulaciones a realizar, al igual que en el apartado 3, se realizan con el software HFSS a fin de conseguir una solución válida del problema que atañe al presente apartado.

En primera instancia, se estima que la distancia mínima será suficiente siempre y cuando la plancha de ABS se encuentre en campo lejano. Para ello se comprueba mediante una aproximación de la región de Fraunhofer como:

$$\frac{2D^2}{\lambda} < r$$

Donde se aproxima:

$$\lambda = \frac{c}{f} \approx \frac{300000 \text{ km/s}}{77 \text{ GHz}} = \frac{3 \times 10^8}{77 \times 10^9} \approx 3.90 \text{ mm}$$

$$D = L_{patch} = 0.887 \text{ mm}$$

Quedando $r > 0.4035 \text{ mm}$, de tal forma que para asegurar se asignó como distancia mínima para simular 5mm (más de 10 veces esta distancia y por añadido mayor a la longitud de onda).

Visto esto, se determinó un barrido paramétrico con el software HFSS, en el cual las distancias que se manejaban partían de 5mm y llegaban hasta 30mm en saltos de 5mm:

$$Distancias[mm] = \{5, 10, 15, 20, 25, 30\}$$

A parte de la distancia entre la antena y el parche de ABS, también se decidió variar el espesor de dicho parche. Para ello se barajaron varias posibilidades.

- La primera consistía en variar desde 2mm de espesor hasta 4mm, en saltos de 0.5mm. Esto es equivalente (aproximadamente) a saltos desde $\lambda/2$ hasta λ , en incrementos de $\lambda/8$.

- La segunda opción barajada, fue variar el espesor exactamente con los valores de la longitud de onda, pero esta fue rápidamente descartada. Esto se debe a que, al haber sido puesto el ABS, la respuesta en frecuencia se desplazó ligeramente de los 77GHz, por lo cual no tenía sentido ser tan precisos.
- Por último, se planteó simular con espesores de 1mm, 2mm y 4mm, los cuales corresponden aproximadamente a $\lambda/4$, $\lambda/2$ y λ .

Con estos datos, distancia y espesor, fueron realizadas diversas simulaciones, las cuales abarcaron todas las posibles combinaciones de ambas variables. Tras la simulación, los datos han sido procesados con MATLAB, a fin de sacar conclusiones o relaciones entre los resultados.

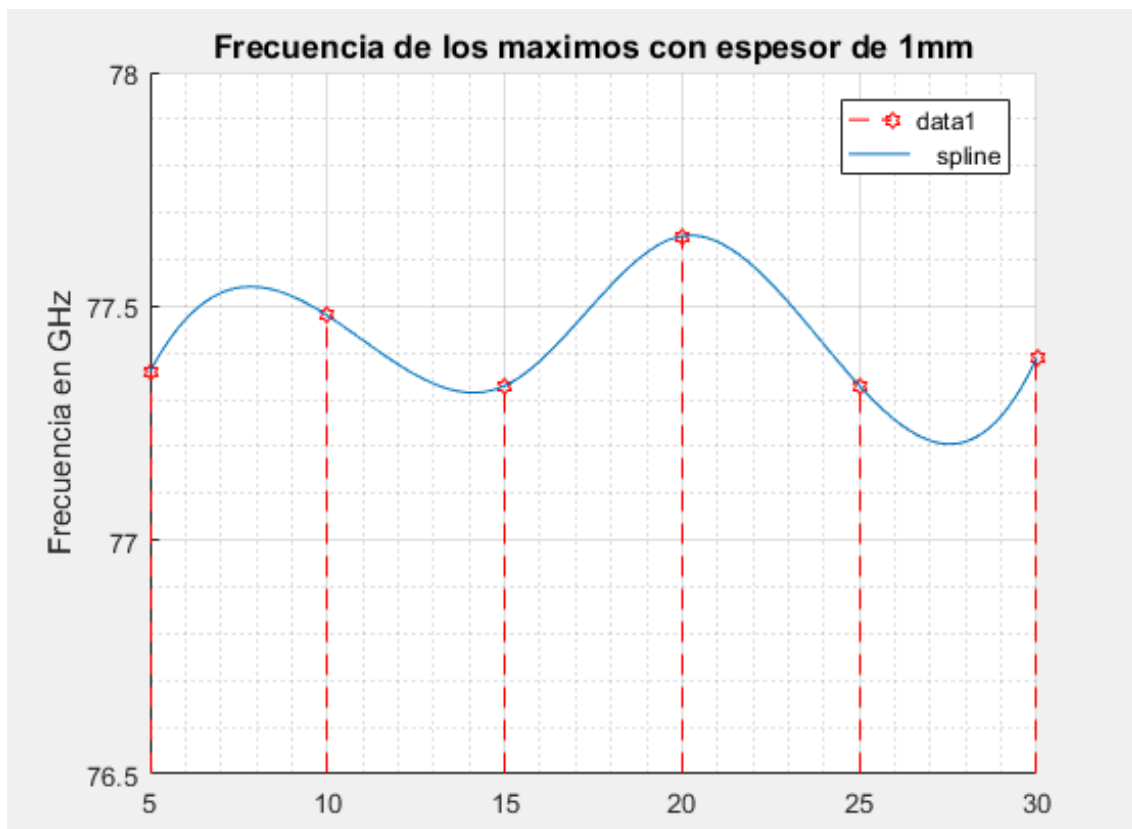


Figura 15. Representación de la frecuencia a la cual se encuentran la mejor adaptación, en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, con espesor de 1mm.

DISTANCIAS [mm]	ESPESOR [mm]					
	1		2		4	
5	77,36	19,3118	77,60	19,5473	77,63	18,9264
10	77,48	17,0460	77,30	16,8699	77,30	17,2463
15	77,33	17,6812	77,12	18,4538	77,39	19,0017
20	77,65	17,8228	77,98	17,4448	77,45	17,2965
25	77,33	17,6103	77,21	18,0088	77,24	18,2965
30	77,39	17,7304	77,42	17,5700	77,42	18,2965
	Frecuencia	Amplitud	Frecuencia	Amplitud	Frecuencia	Amplitud

Tabla 1: Frecuencia y máximo de los valores de adaptación de la antena en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, y el espesor de este.

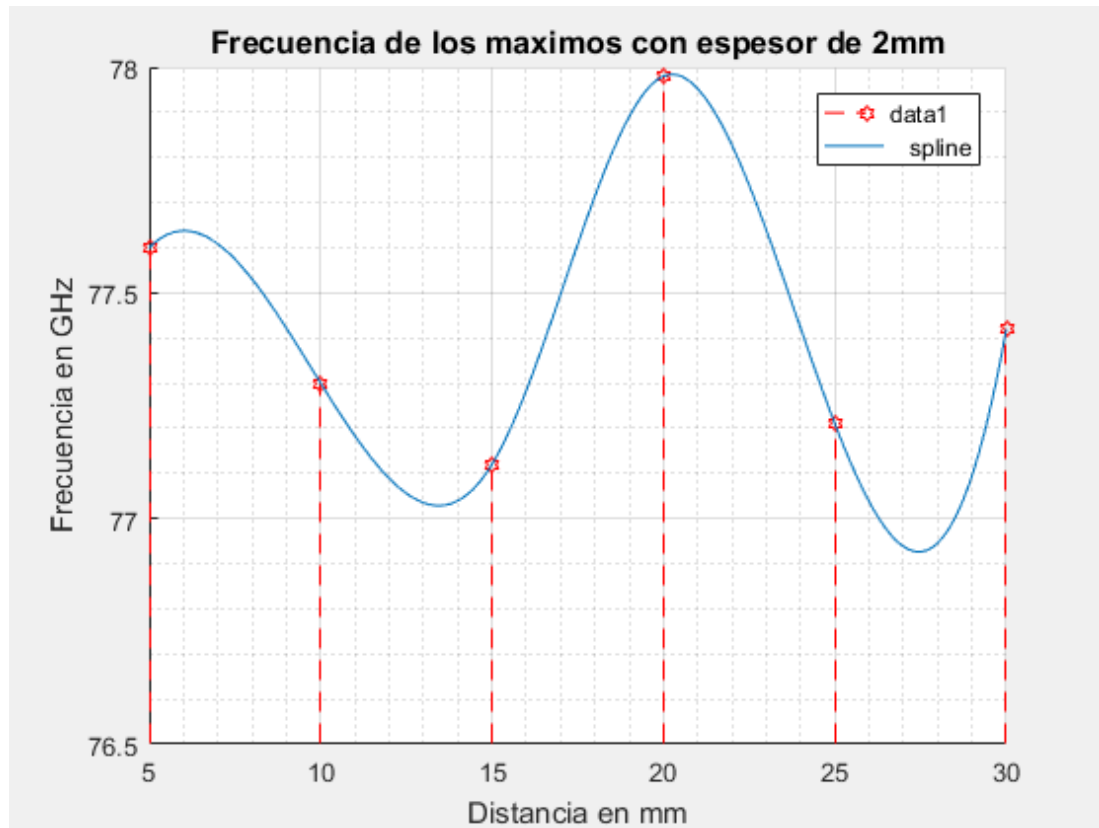


Figura 16: Respresentación de la frecuencia a la cual se encuentran la mejor adaptación, en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, con espesor de 2mm.

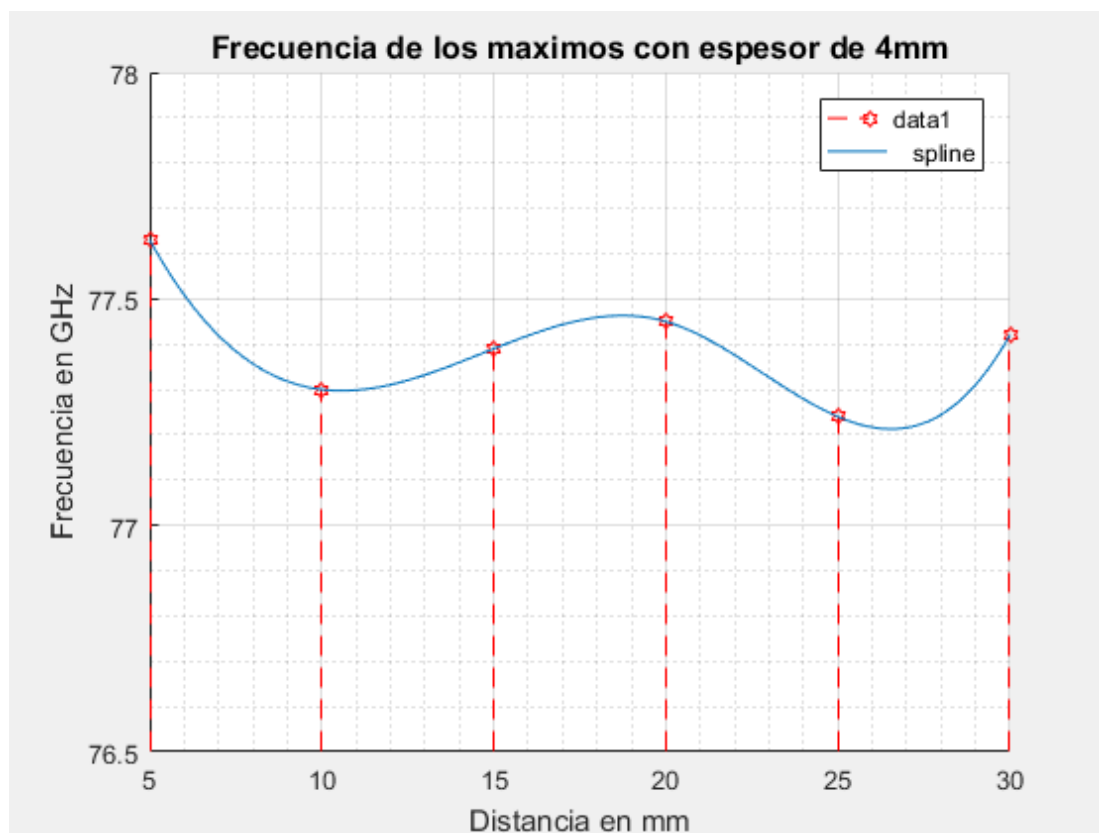


Figura 17: Respresentación de la frecuencia a la cual se encuentran la mejor adaptación, en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, con espesor de 4mm.

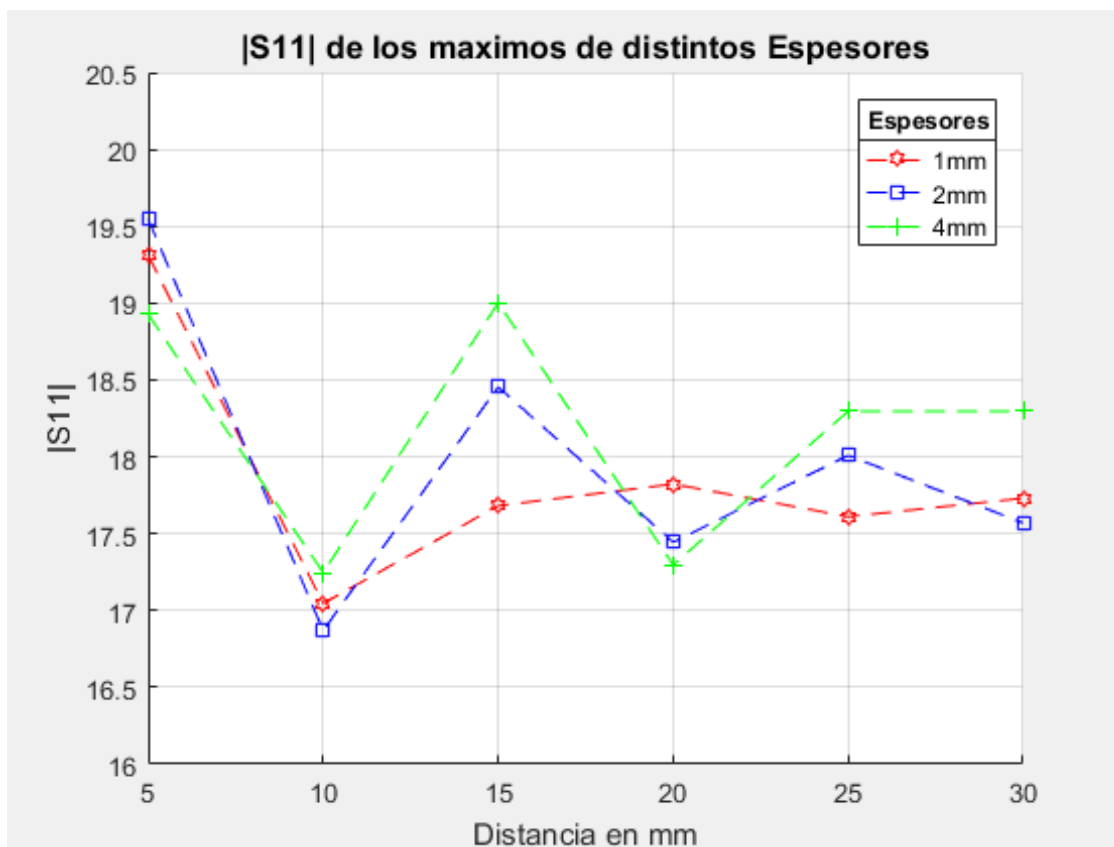


Figura 18: Adaptación de la antena en función de diversas distancias y espesores del dieléctrico.

De estos datos se pueden inferir ciertas conclusiones. En primer lugar, se observa que hay cierta dependencia la frecuencia en la cual se encuentra la mejor adaptación de la antena, con la distancia de ésta al dieléctrico. Esta dependencia se puede considerar de forma senoidal, puesto que la tendencia que tiene así lo deja ver y, además, las distancias de separación están tomadas en diferencias longitudes más de dos veces mayores a la longitud de onda.

Cabe resaltar que de entre todas estas medidas, para simular la que corresponde a espesor 4mm y distancia 20mm, hubo que cambiar el número mínimo de iteraciones de la simulación a 4. Esto es debido a que la ΔS máxima es inferior a 0.02 en la tercera iteración, por lo cual detiene la simulación dando como resultado una medida errónea.

4.2.1.- Conclusiones

En este apartado se van a comparar las diferencias producidas en cuanto al diagrama de radiación y los cortes plano E y plano H, en relación con dos distancias distintas entre la antena y el dieléctrico. Estas distancias a comparar han sido elegidas como 10 mm y 15 mm. La distancia de 10 mm ha sido elegida debido a que es el caso

con mayores reflexiones (ver figura 18), siendo la distancia de 15 mm una con menores reflexiones.

En primer lugar, se observan los diagramas de radiación de la antena a 10 mm de distancia del ABS, con espesores de 1mm (figura 19), 2 mm (figura 20) y 4 mm (figura 21).

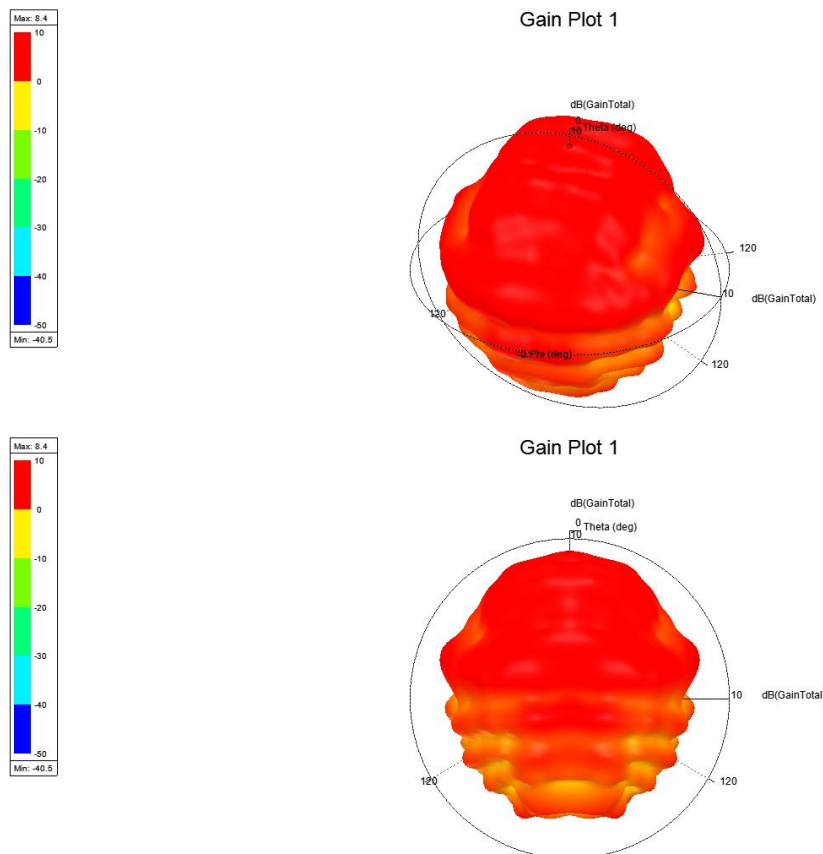
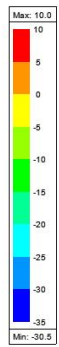
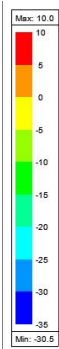
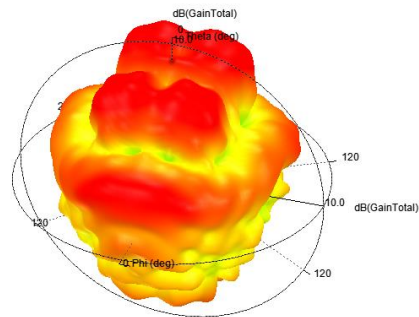


Figura 19: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 1 mm y distancia entre este y la antena de 10 mm.



Gain Plot 3



Gain Plot 3

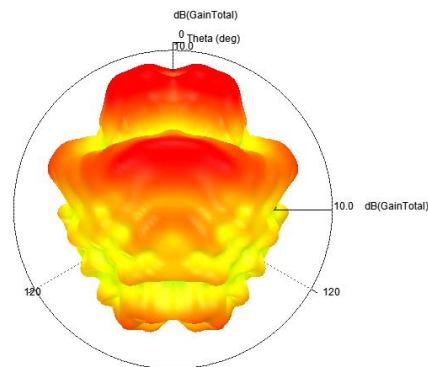


Figura 20: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 2 mm y distancia entre este y la antena de 10 mm.

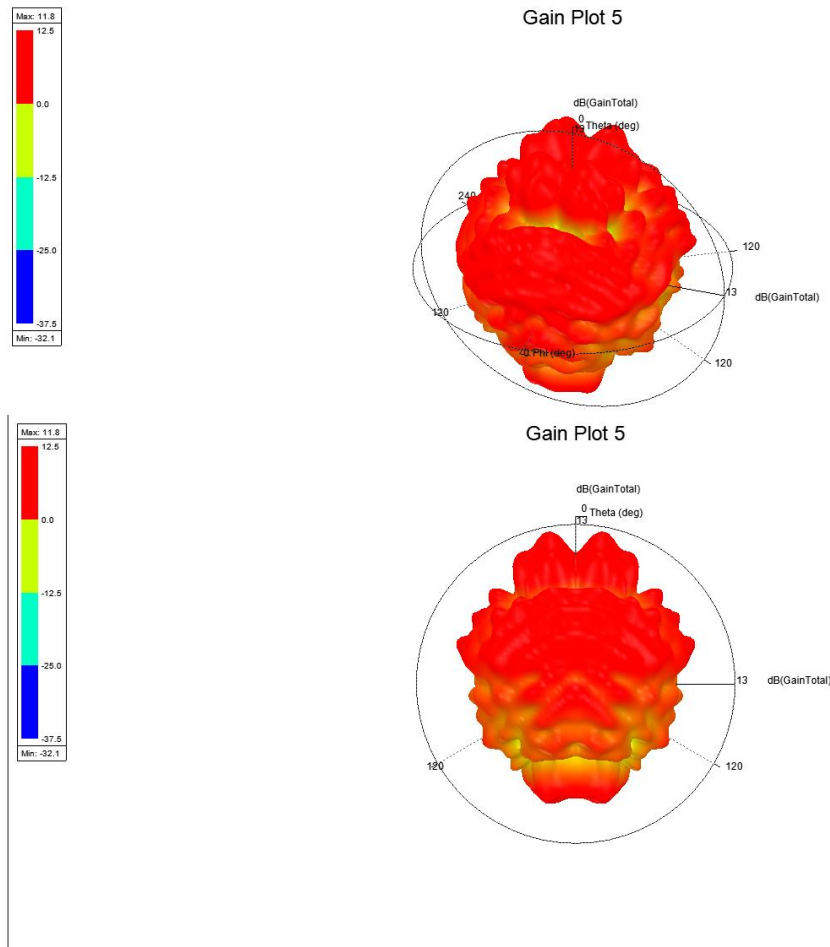


Figura 21: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 4 mm y distancia entre este y la antena de 10 mm.

A la vista de estos resultados se puede apreciar cómo, a mayor espesor de la plancha de ABS, se tiene mayor ganancia. Esto se debe a que las reflexiones ocasionadas por el dieléctrico son mayores conforme menor es el espesor (figura 18). La mejora en potencia de los diagramas de radiación varía desde 8.4 dB para espesor de 1 mm (figura 19), hasta 11.8 dB para 4 mm (figura 21). Esta mejora se trata de 3.4 dB, lo que en unidades naturales equivale a una mejora de aproximadamente 2.2 veces más ganancia con un espesor de 4mm frente a 1 mm.

En cuanto al plano E refiere (figura 22), cabe resaltar que los cortes planos E son bastante similares, a excepción de un pico con ganancia mayor a -50 dB en presencia de la plancha de ABS de 1 mm de espesor en $\theta \cong 90^\circ$.

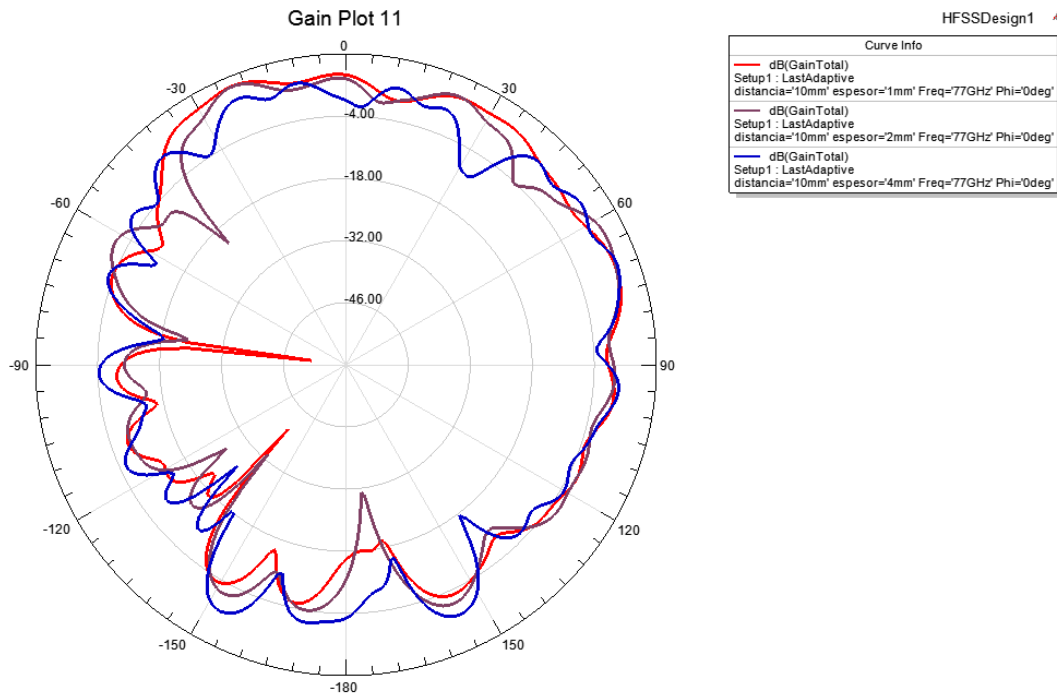


Figura 22: Cortes plano E con separación entre parche ABS y antena de 10mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).

En contraposición al corte plano E, el plano H (figura 23) presenta simetría con respecto a ϕ , debido a la simetría proporcionada por la antena (lo cual permite dividir el modelo a simular en HFSS).

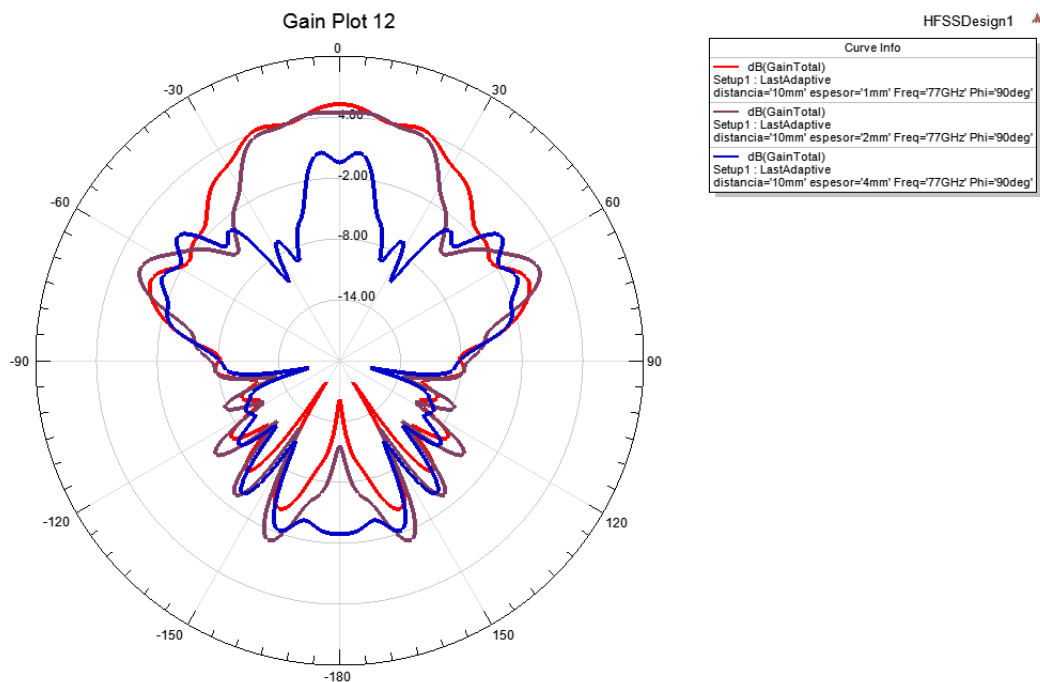


Figura 23: Cortes plano H con separación entre parche ABS y antena de 10mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).

La otra medida escogida, con una distancia de 15 mm entre el ABS y la antena, como ya se ha mencionado proporciona menores reflexiones. En base a esto con los datos que se pueden observar los diagramas de radiación de la antena en las siguientes figuras, se comparan las diferentes ganancias con respecto a la separación de 10 mm. Como era de esperar, con un mismo espesor del dieléctrico la ganancia es mayor en todos los diagramas. El caso en que mayor diferencia hay es con espesor de 1 mm, siendo de 8.4 dB con una separación entre parche y ABS de 15 mm (figura 24), y tan sólo de 9.1 dB en el caso de 10 mm (figura 19).

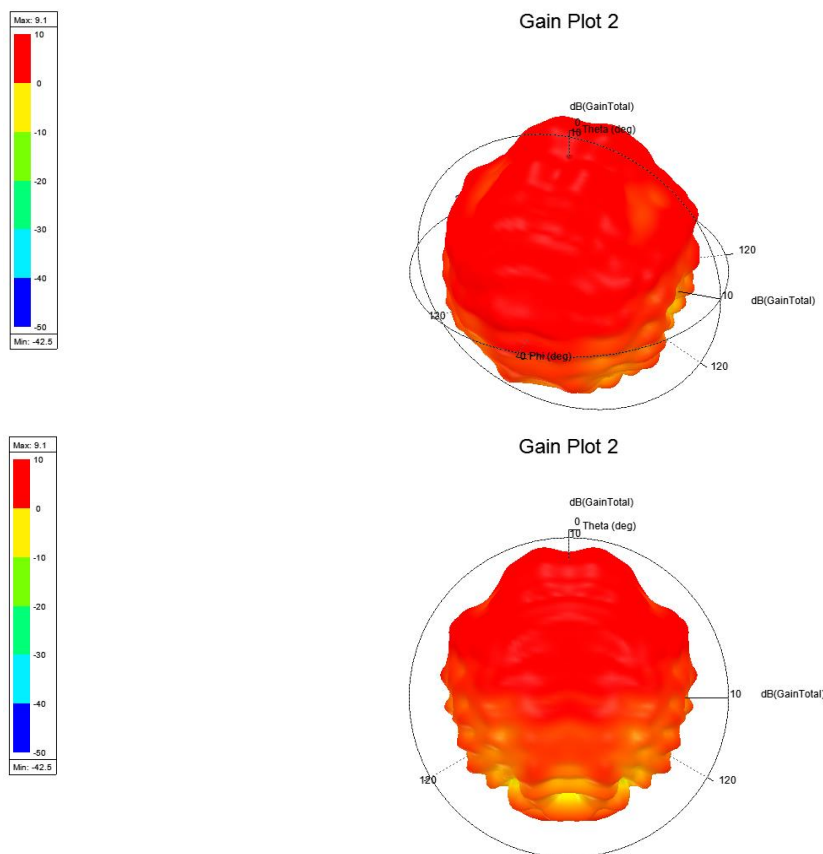
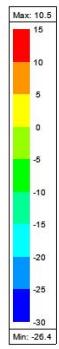
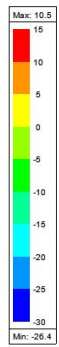
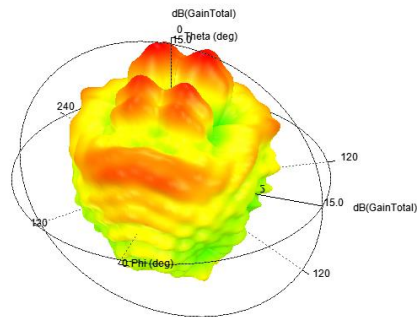


Figura 24: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 1 mm y distancia entre este y la antena de 15 mm.



Gain Plot 4



Gain Plot 4

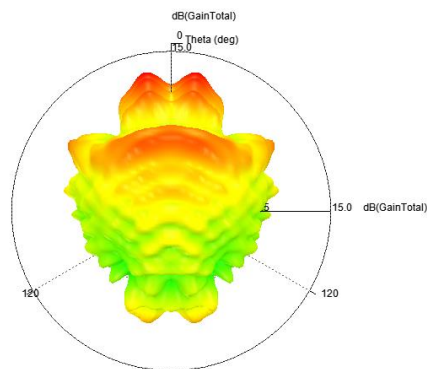


Figura 25: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 2 mm y distancia entre este y la antena de 15 mm.

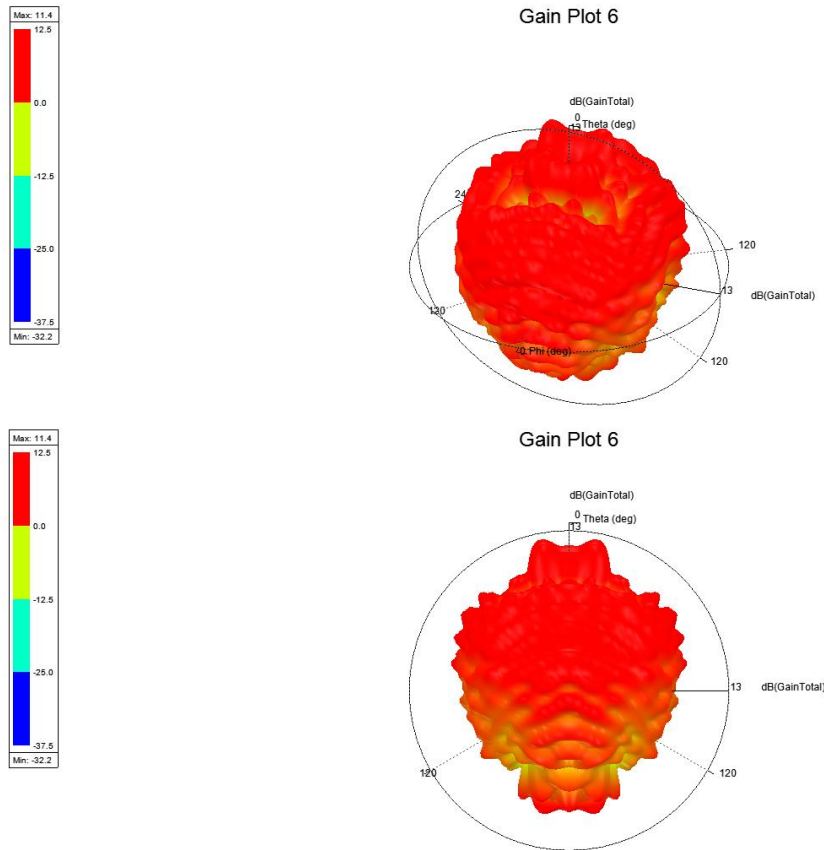


Figura 26: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 4 mm y distancia entre este y la antena de 15 mm.

A la vista de estos resultados se puede apreciar cómo, a mayor espesor de la plancha de ABS, se tiene mayor ganancia. Esto se debe a que las reflexiones ocasionadas por el dieléctrico son mayores conforme menor es el espesor (figura 24). La mejora en potencia de los diagramas de radiación varía desde 9.1 dB para espesor de 1 mm (figura 19), hasta 11.4 dB para 4 mm (figura 26). Esta mejora se trata de 2.3 dB, lo que en unidades naturales equivale a una mejora de aproximadamente 1.7 veces más ganancia con un espesor de 4mm frente a 1 mm.

En cuanto al plano E refiere (figura 27), cabe resaltar que los cortes planos E son bastante similares, a excepción de un pico con ganancia mayor a -40 dB en presencia de la plancha de ABS de 1 mm de espesor en $\theta \cong 145^\circ$ (lóbulos traseros).

Para el corte plano H (figura 28), lo único reseñable sigue siendo la simetría ya explicada con anterioridad.

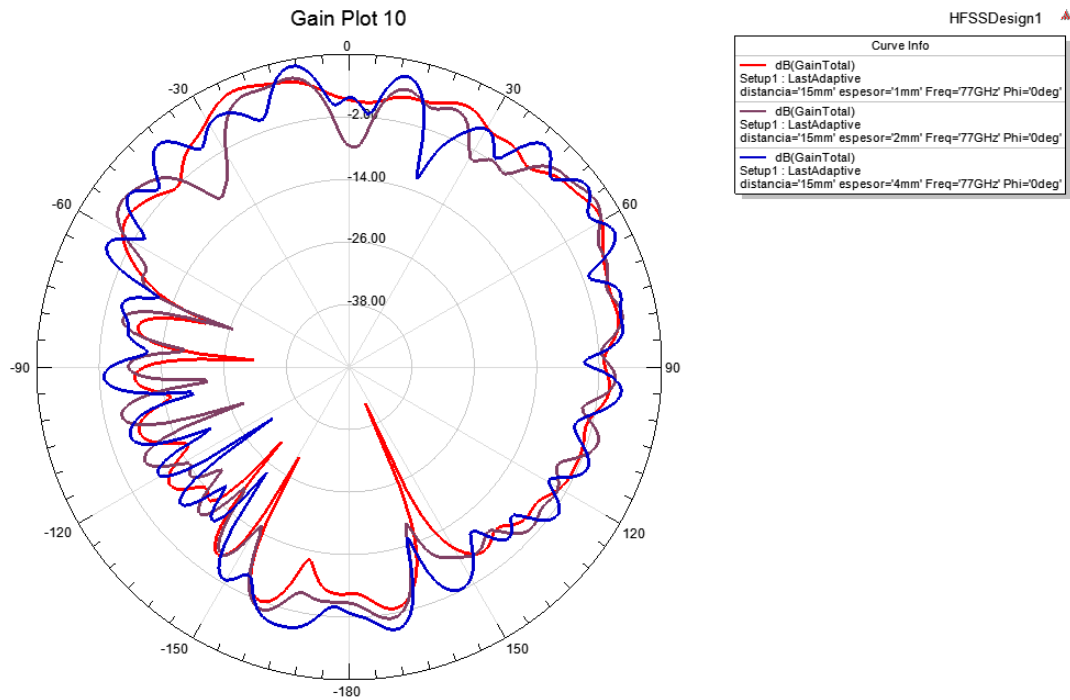


Figura 27: Cortes plano E con separación entre parche ABS y antena de 15mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).

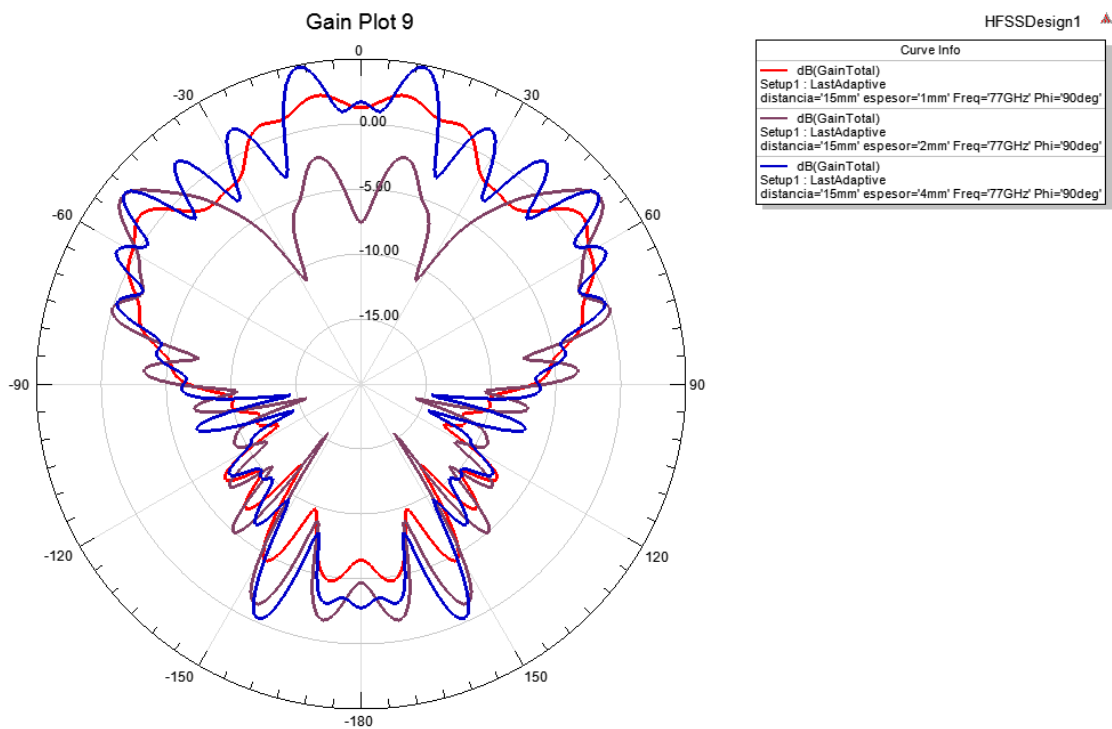


Figura 28: Cortes plano H con separación entre parche ABS y antena de 15mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).

4.3.- Simulación aumentando el tamaño plano de masa

La última modificación sobre este esquemático fue aumentar el tamaño del plano de masa para así comprobar como se comportaba la antena en un modelo más realista. Este modelo se puede considerar más realista puesto que la finalidad de dicha antena le conlleva estar en el interior del capó de un vehículo. Esto quiere decir que lo que la antena tendrá tras ella es un motor, una batería y demás componentes metálicos. Puesto que la caracterización de todos estos componentes es extremadamente compleja, se toma el peor caso posible: un plano de masa que puede considerarse infinito, ya que el tamaño del plano de masa es mucho mayor que la longitud de onda (en torno a 100 veces).

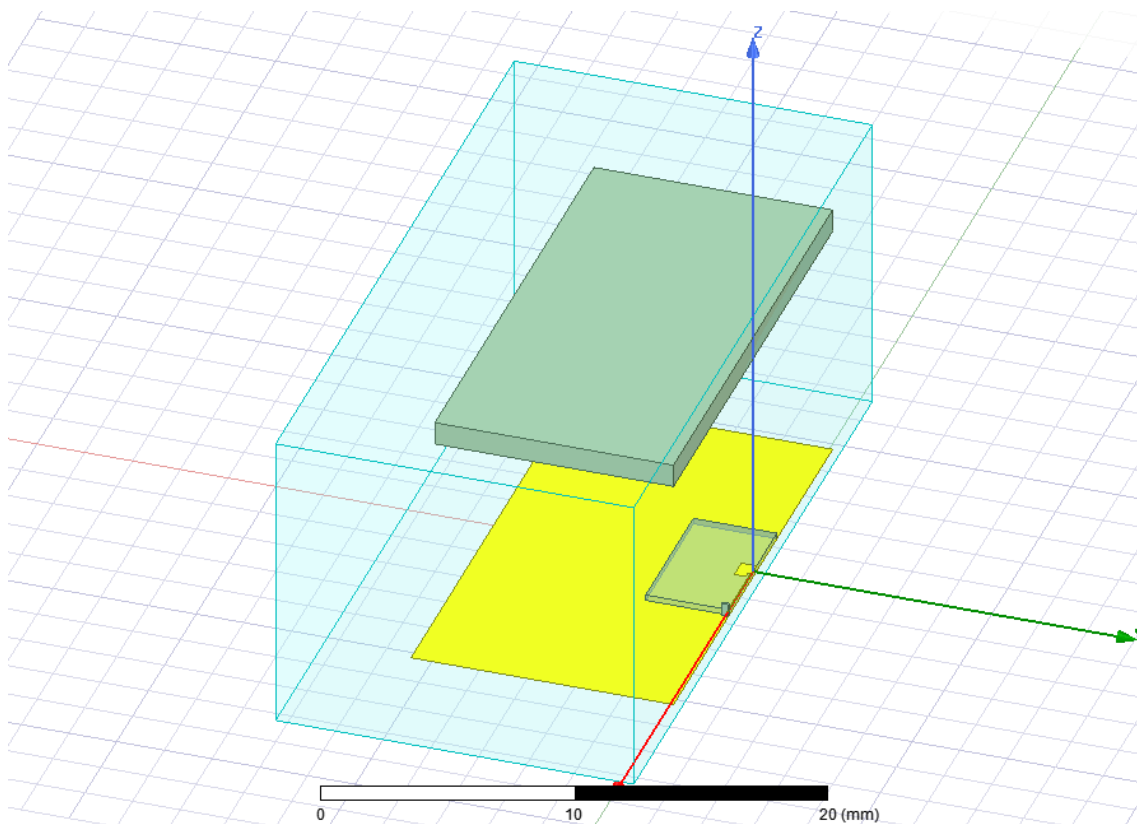


Figura 29: Diseño de la antena frente a plancha de ABS, en presencia de un plano de masa mayor.

A diferencia de en la simulación anterior, aquí se ha querido ser más preciso en cuanto a las distancias a las que se coloca el dieléctrico, pero manteniendo los espesores del apartado anterior. La distancia mínima entre la antena y la plancha de ABS ya no es 5mm (pues se trata de una distancia extremadamente pequeña), si no que empieza en 7.5mm (aproximadamente una longitud de onda mayor que 5mm). Si bien la distancia mínima ha sido modificada, la máxima sigue manteniéndose en 30mm. En este caso los cambios de distancias entre simulaciones se han determinado como 2.5mm, de tal forma que se consiguen el doble de puntos de observación que en el anterior apartado.

DISTANCIAS [mm]	ESPESOR [mm]					
	1		2		4	
7,5	76,82	14,3770	76,49	14,8334	76,55	17,0254
10	76,94	14,2968	77,00	14,2382	76,64	14,0734
12,5	76,94	15,2531	76,97	15,0470	77,18	14,8131
15	76,88	14,9953	76,82	15,4416	77,12	15,6672
17,5	76,85	14,5476	76,79	14,7289	76,70	14,8377
20	77,09	14,8335	77,09	14,5314	76,52	14,5781
22,5	76,97	15,1466	77,06	15,2643	77,15	15,1229
25	76,85	14,8507	76,82	14,8036	76,88	15,3364
27,5	76,82	14,7518	76,91	14,8805	77,12	14,9547
30	77,06	14,6873	77,00	14,5595	76,82	14,6690
	Frecuencia	Amplitud	Frecuencia	Amplitud	Frecuencia	Amplitud

Tabla 2: Frecuencia y máximo de los valores de adaptación de la antena en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, y el espesor de este.

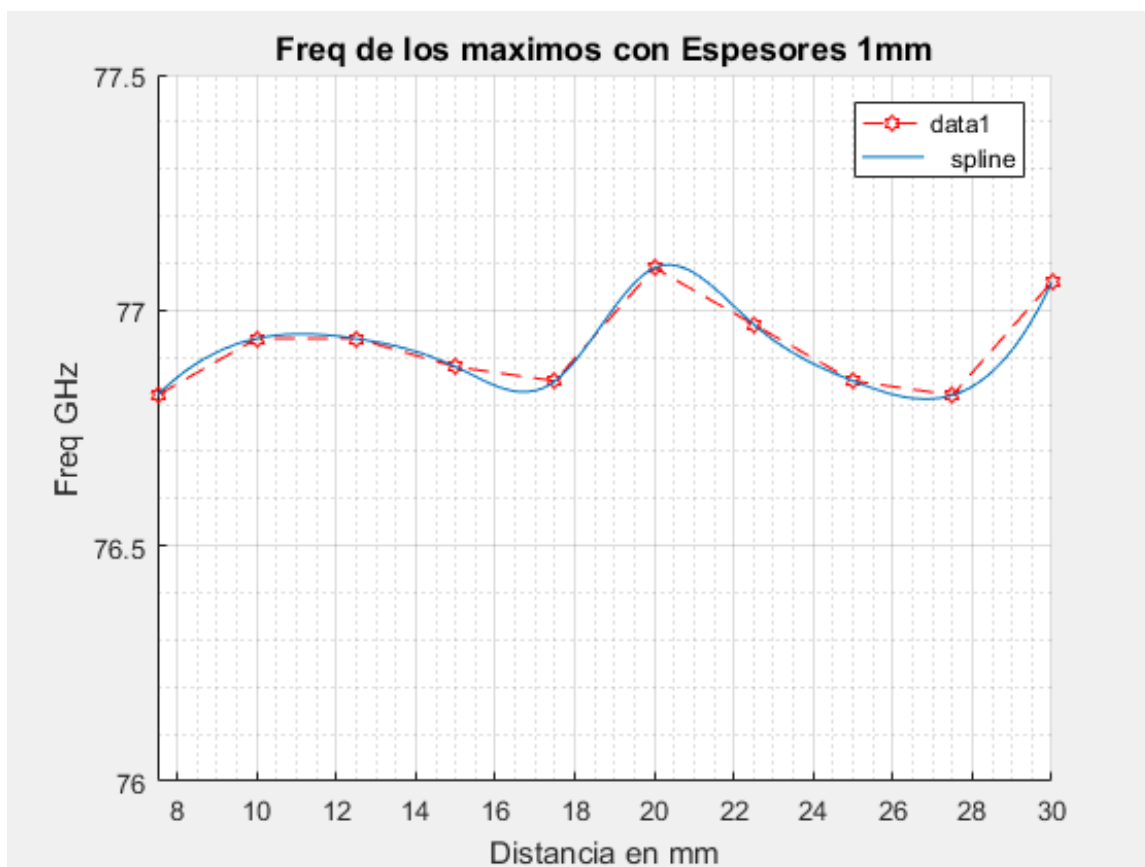


Figura 30: Representación de la frecuencia a la cual se encuentran la mejor adaptación, en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, con espesor de 1mm.

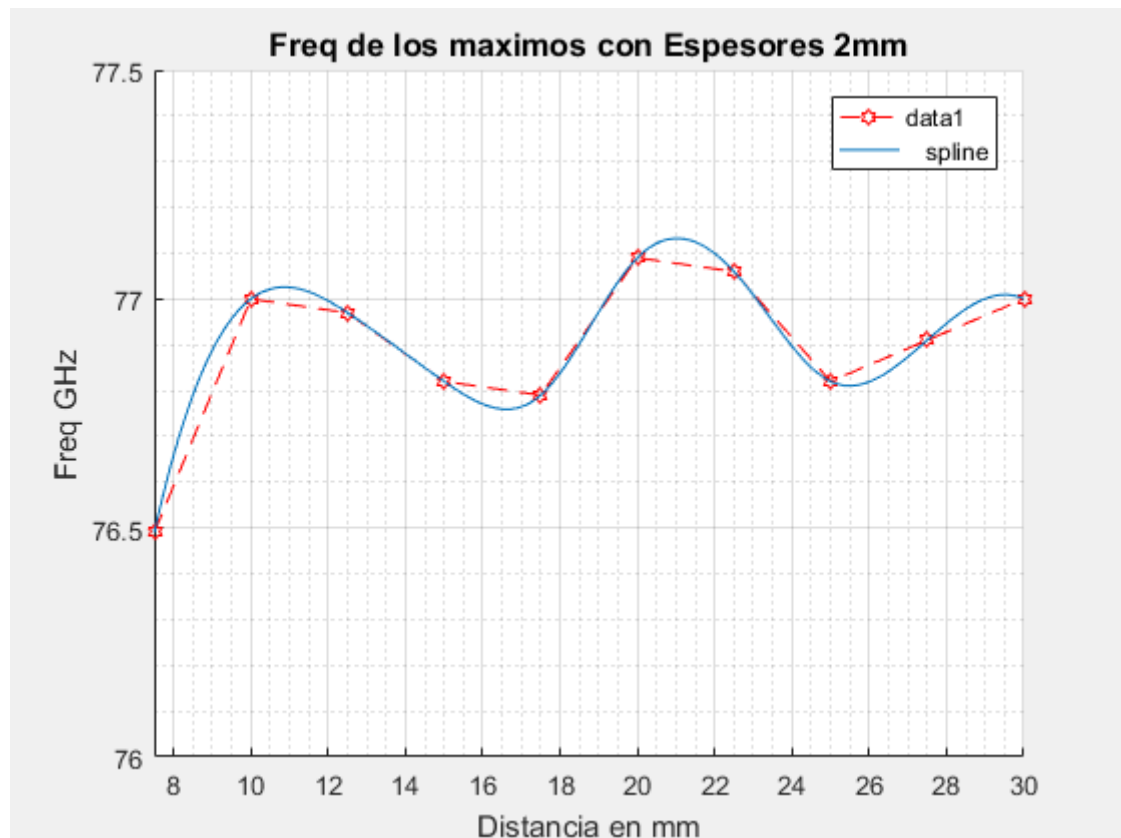


Figura 32: Respresentación de la frecuencia a la cual se encuentran la mejor adaptación, en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, con espesor de 2mm.

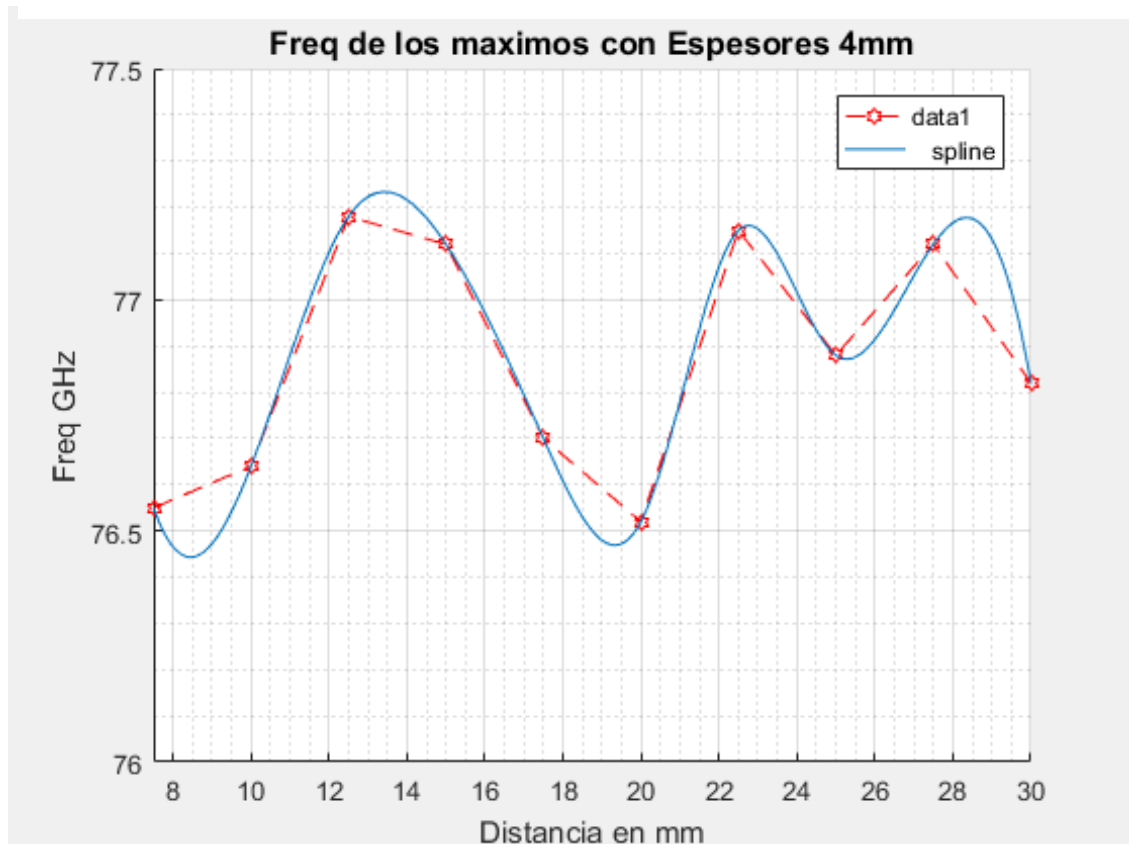


Figura 31: Respresentación de la frecuencia a la cual se encuentran la mejor adaptación, en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, con espesor de 4mm.

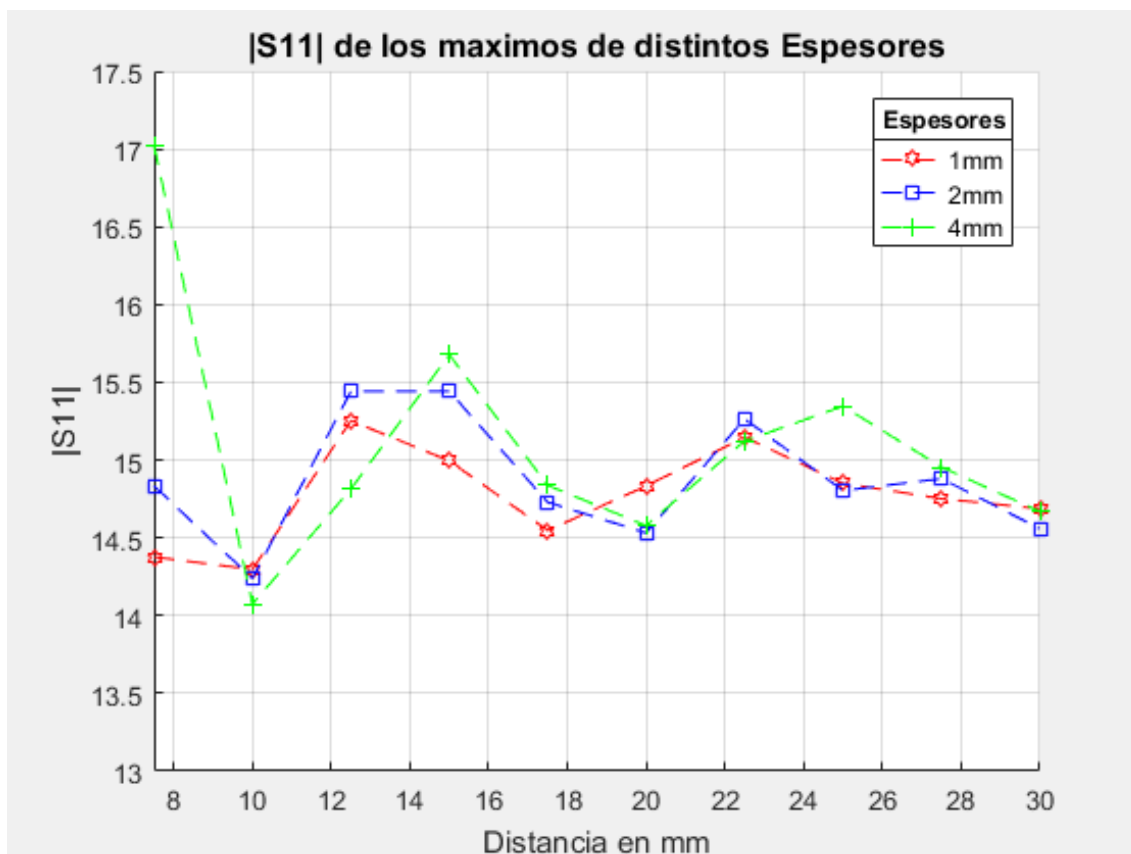


Figura 33: Adaptación de la antena en función de diversas distancias y espesores del dieléctrico.

4.3.1.- Conclusiones

Al igual que en el apartado 4.2.1, en este apartado se van a comparar las diferencias producidas en cuanto al diagrama de radiación y los cortes plano E y plano H, en relación con dos distancias distintas entre la antena y el dieléctrico. Estas distancias a comparar han sido elegidas como 10 mm y 15 mm. La de separación entre la antena y la plancha de ABS, han sido escogidas siguiendo el mismo criterio (figura 33).

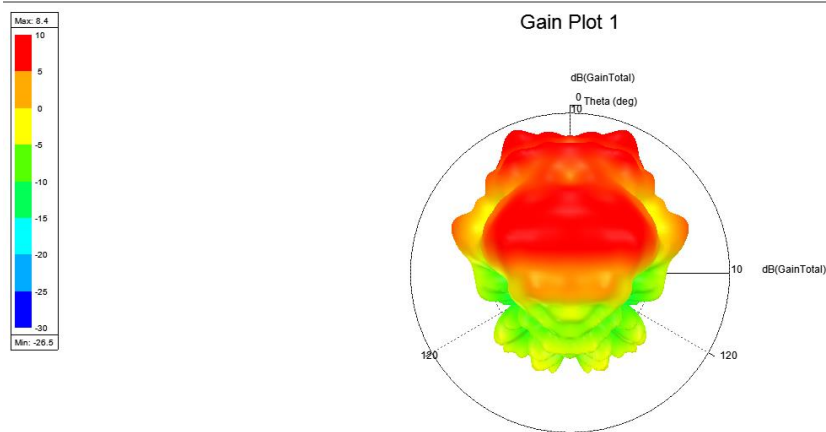
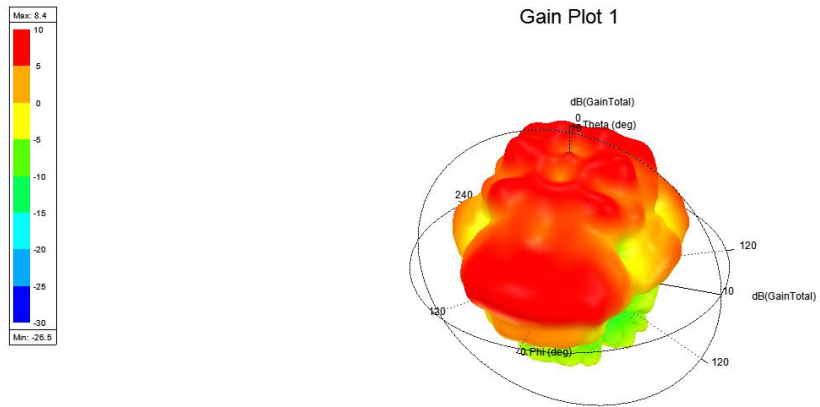


Figura 34: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 1 mm y distancia entre este y la antena de 10 mm.

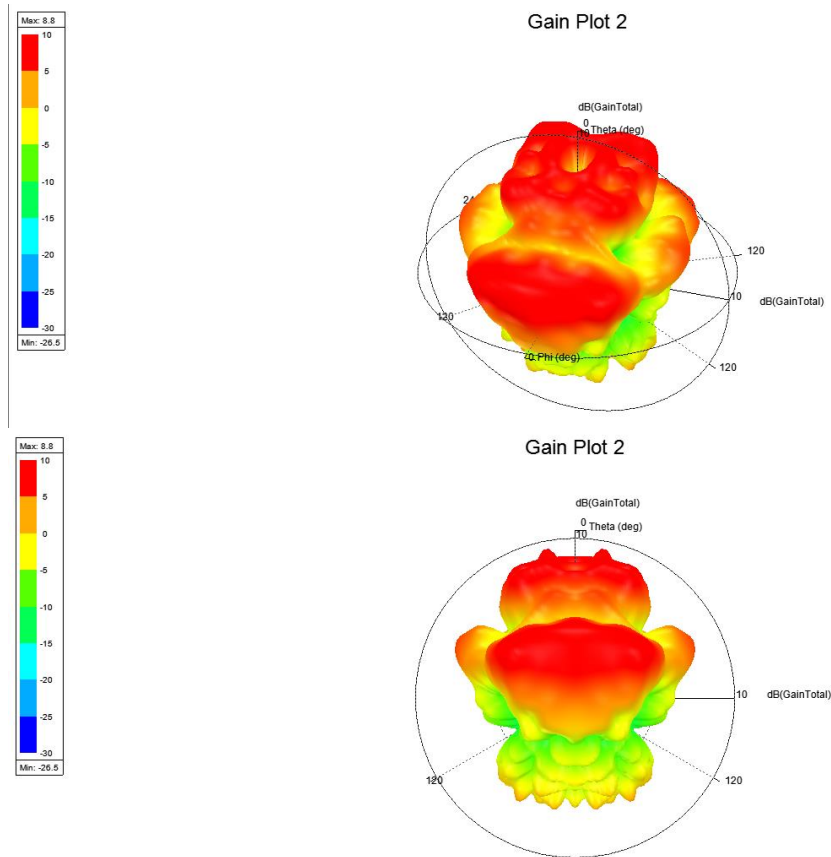


Figura 35: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 2 mm y distancia entre este y la antena de 10 mm.

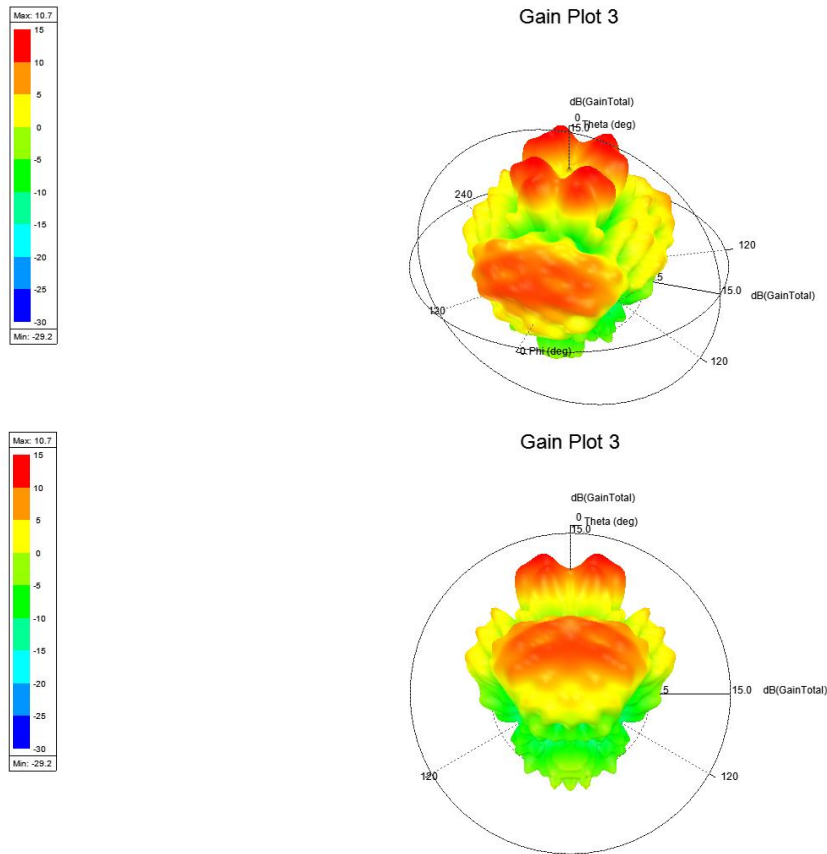


Figura 36: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 4 mm y distancia entre este y la antena de 10 mm.

A la vista de estos resultados se puede concluir que, a mayor espesor de la plancha de ABS, se tiene mayor ganancia. Esto se debe a que las reflexiones ocasionadas por el dieléctrico son mayores conforme menor es el espesor (figura 33). La mejora en potencia de los diagramas de radiación varía desde 8.4 dB para espesor de 1 mm (figura 34), hasta 10.7 dB para 4 mm (figura 36). Esta mejora se trata de 2.3 dB, lo que en unidades naturales equivale a una mejora de aproximadamente 1.7 veces más ganancia con un espesor de 4mm frente a 1 mm.

En cuanto al plano E refiere (figura 37), cabe resaltar que los cortes planos E son bastante similares, a excepción de un pico con ganancia mayor a -40 dB en presencia de la plancha de ABS de 4 mm de espesor en $\theta \cong -165^\circ$.

Al igual que en el resto de aparatados, el plano H (figura 38), tan sólo sigue siendo interesante por su simetría.

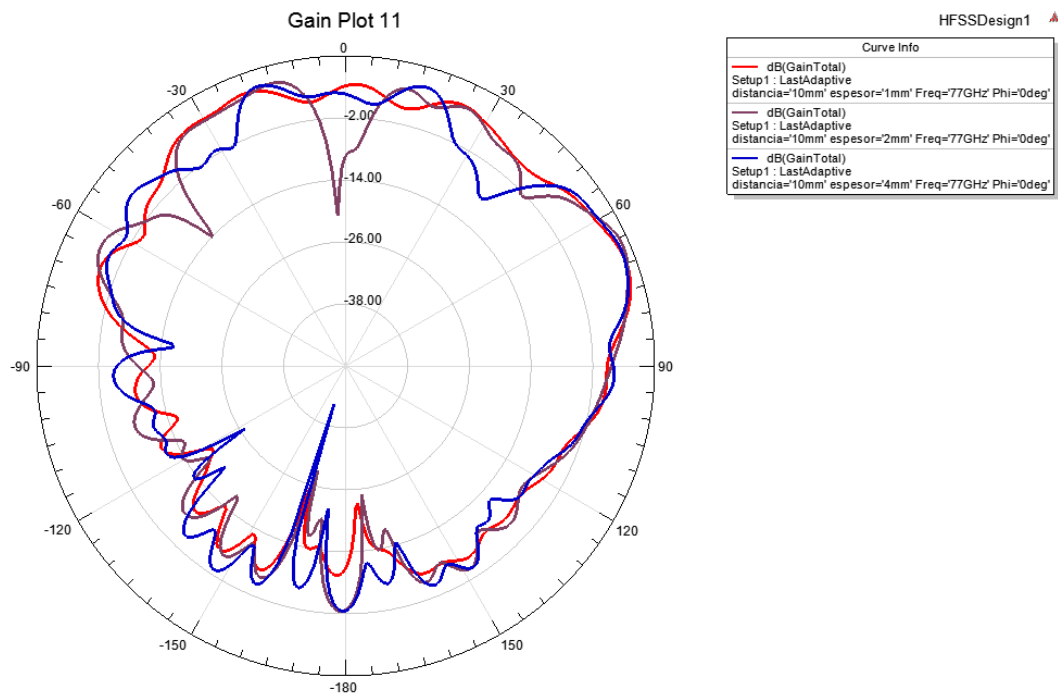


Figura 37: Cortes plano E con separación entre parche ABS y antena de 10 mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).

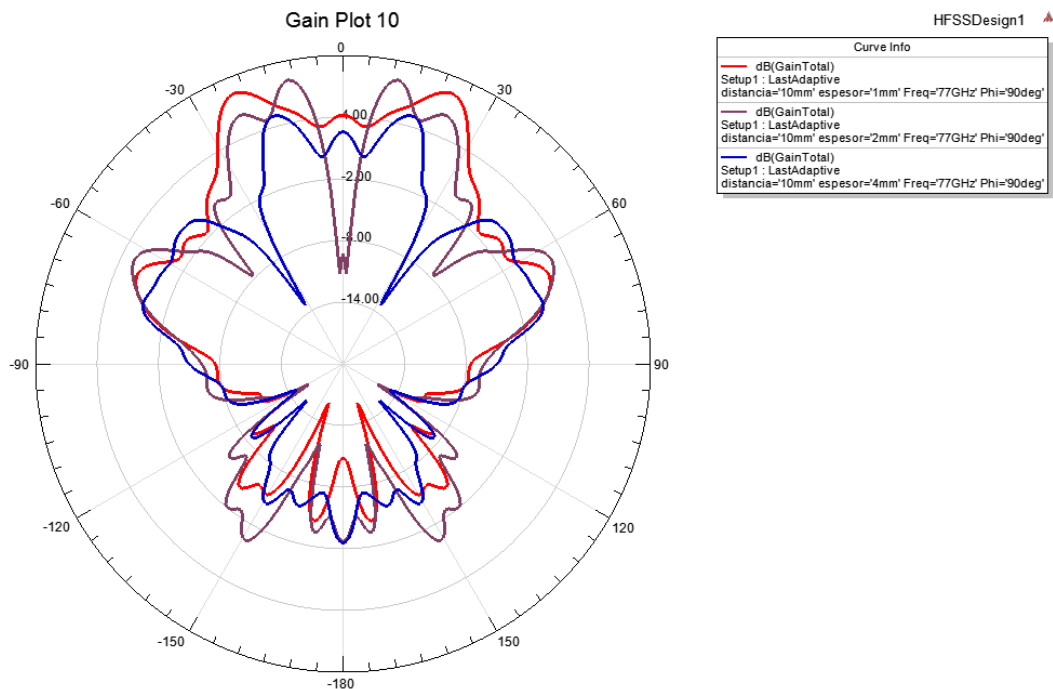


Figura 38: Cortes plano H con separación entre parche ABS y antena de 10 mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).

Las otras medidas escogidas, con una distancia de 15 mm entre la antena y el dieléctrico, como ya se ha mencionado proporciona menores reflexiones. En base a esto y con los datos que se pueden observar los diagramas de radiación de la antena en las siguientes figuras, se comparan las diferentes ganancias con respecto a la separación de 10 mm. Como era de esperar, con un mismo espesor del dieléctrico la ganancia es mayor en todos los diagramas. El caso en que mayor diferencia hay es con espesor de 2 mm, siendo de 10 dB con una separación entre parche y ABS de 15 mm (figura 35), y tan sólo de 8.8 dB en el caso de 10 mm (figura 40).

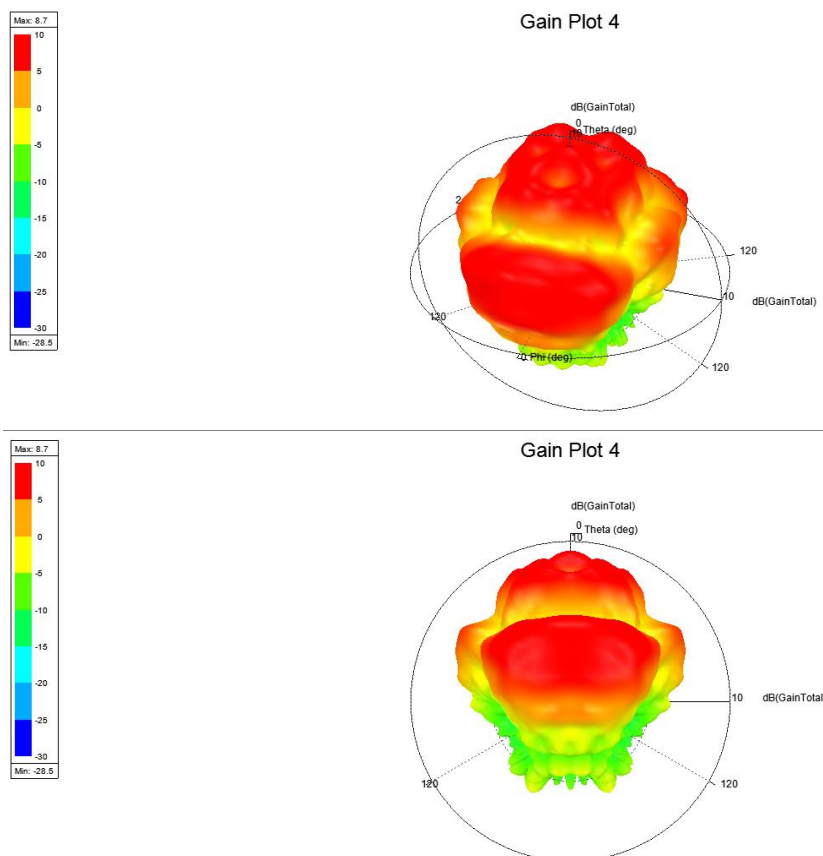
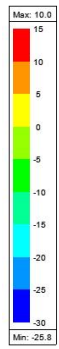
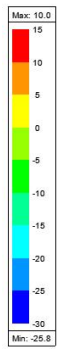
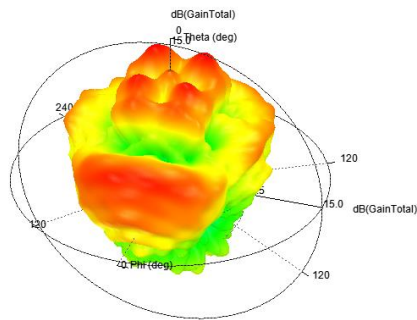


Figura 39: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 1 mm y distancia entre este y la antena de 15 mm.



Gain Plot 5



Gain Plot 5

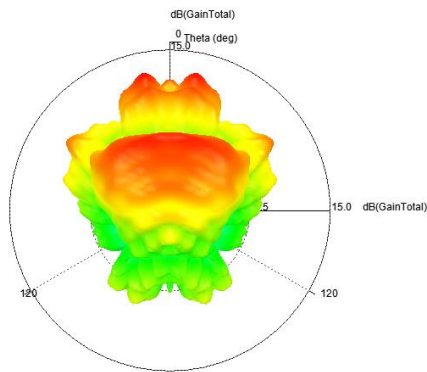


Figura 40: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 2 mm y distancia entre este y la antena de 15 mm.

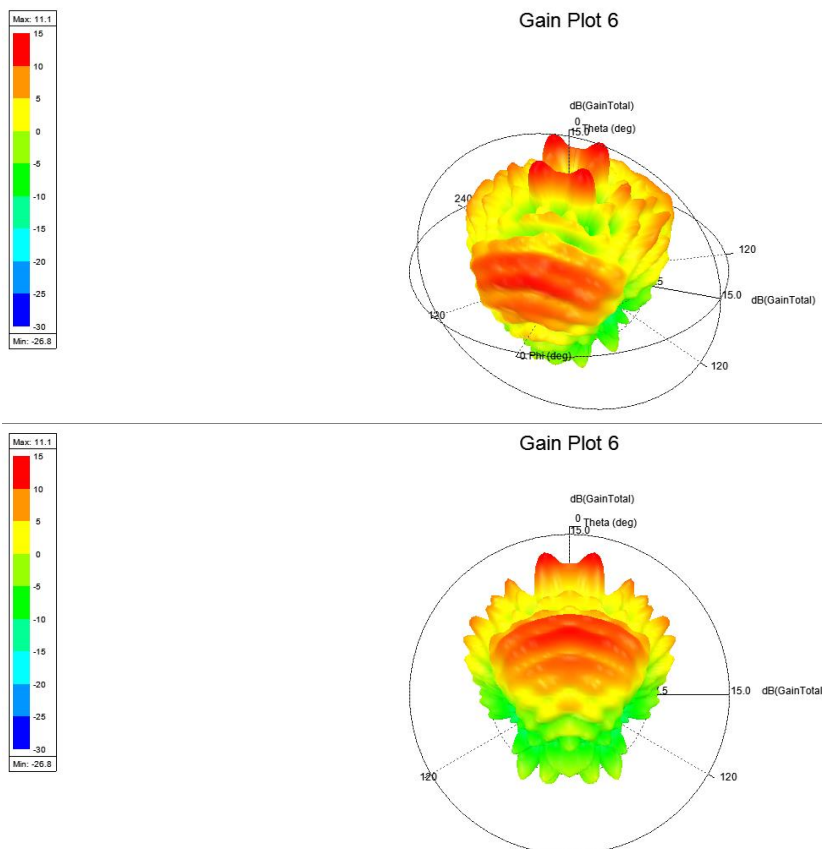


Figura 41: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 4 mm y distancia entre este y la antena de 15 mm.

A la vista de estos resultados se puede concluir que, a mayor espesor de la plancha de ABS, se tiene mayor ganancia. Esto se debe a que las reflexiones ocasionadas por el dieléctrico son mayores conforme menor es el espesor (figura 33). La mejora en potencia de los diagramas de radiación varía desde 8.7 dB para espesor de 1 mm (figura 39), hasta 11.1 dB para 4 mm (figura 41). Esta mejora se trata de 2.4 dB, lo que en unidades naturales equivale a una mejora de aproximadamente 1.7 veces más ganancia con un espesor de 4mm frente a 1 mm.

En cuanto al plano E se refiere (figura 42), cabe resaltar que los cortes planos E son bastante similares, pero a diferencia de en los costes plano E de los apartados anteriores (figura 22, figura 27, figura 37), tiene lóbulos traseros mucho menores que el lóbulo principal. Esto ocurre sobre todo entre $-90^\circ > \theta > -150^\circ$. Esto se debe a que el plano de masa actúa como reflector, produciendo de dicha forma que la potencia que radie hacia atrás sufra reflexiones que afecten a su dirección.

Al igual que en el resto de apartados, el plano H (figura 43), tan sólo sigue siendo interesante por su simetría.

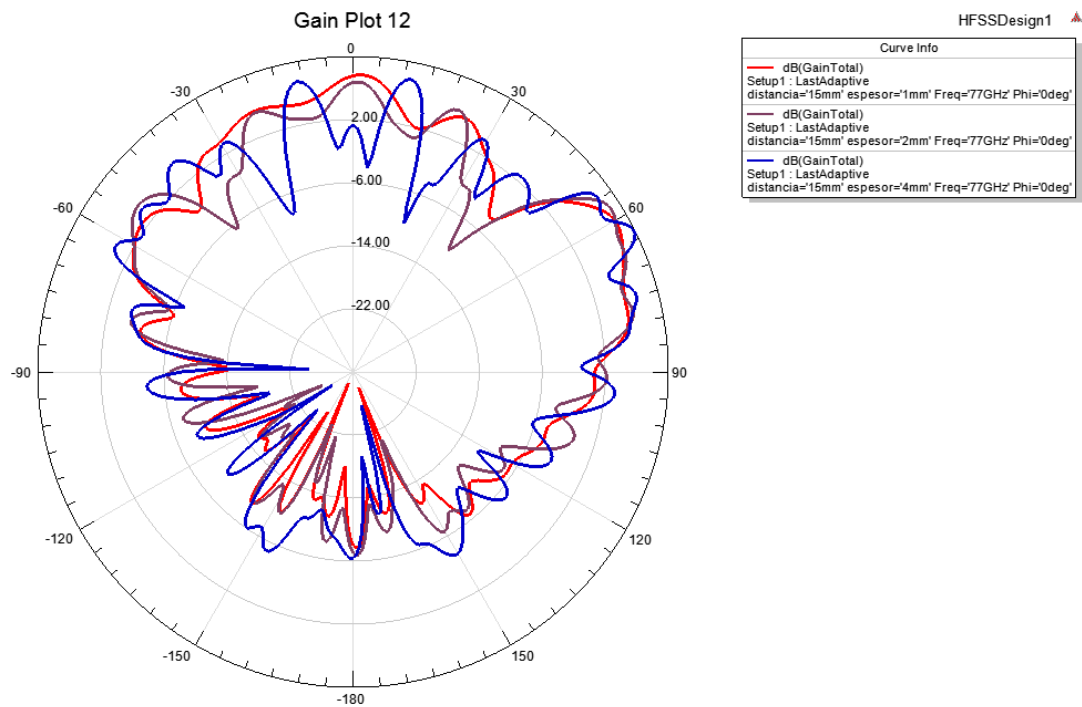


Figura 42: Cortes plano E con separación entre parche ABS y antena de 15 mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).

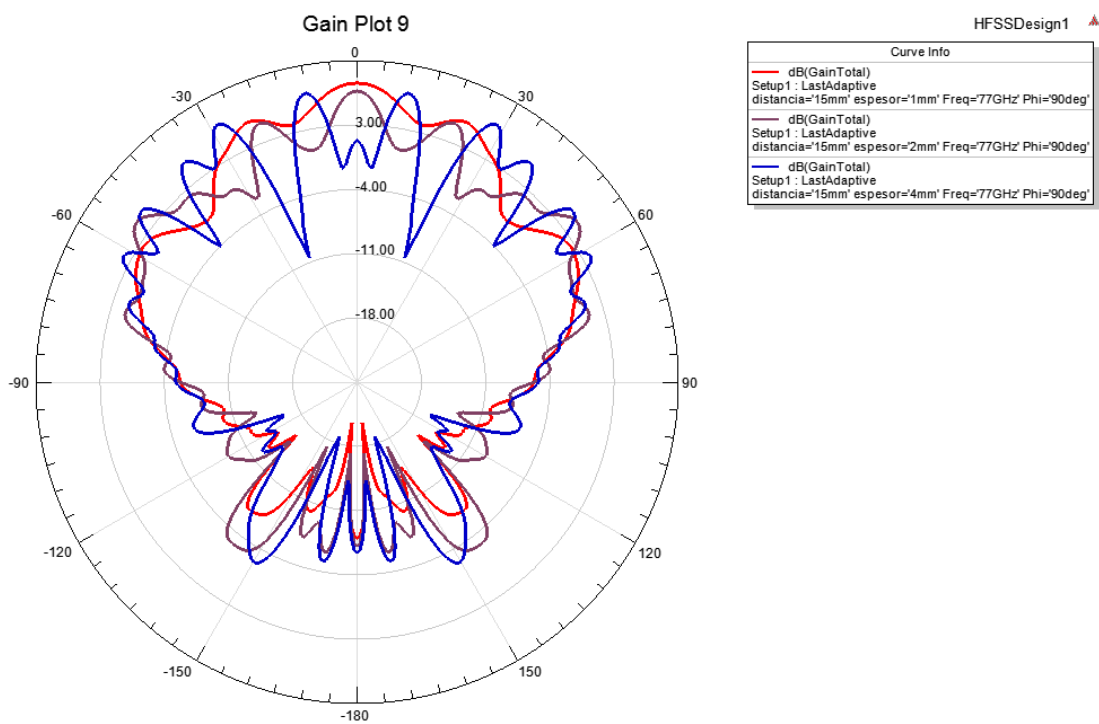


Figura 43: Cortes plano H con separación entre parche ABS y antena de 15 mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).

5.- Caracterización de la respuesta de la antena en presencia de un parachoques de ABS

5.1.- Introducción

En el presente apartado se trata de dar una solución más realista al problema propuesto durante este trabajo fin de estudios. Para ello, en lugar de realizar simulaciones con la antena frente a una lámina de ABS, se ha sustituido esta lámina por un modelo más realista (figura 44). El modelo utilizado ha sido diseñado externamente mediante el uso de AutoCAD e importado a HFSS, pero manteniendo las características del ABS previamente presentadas (apartado 4.1). Este modelo se trata de un modelo real del parachoques de un coche.

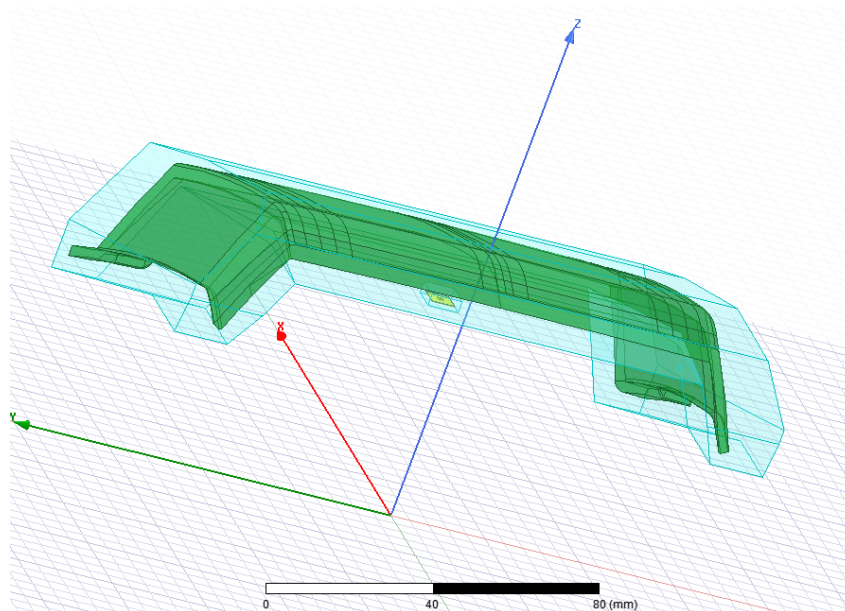


Figura 44: Diseño parachoques ABS.

Al igual que en el apartado 4, a fin de reducir la carga que debe soportar el ordenador, se decide realizar una división según el plano XZ (figura 45).

El último ajuste previo a la simulación es eliminar el borde lateral del modelo del parachoques. Esto se debe a que, en una primera prueba con el dieléctrico completo, los resultados obtenidos no fueron concluyentes puesto que el ordenador tan sólo era capaz de realizar una iteración. Dicha prueba se realizó (al igual que en los apartados anteriores) meramente por el hecho de buscar incoherencias y no en busca de resultados.

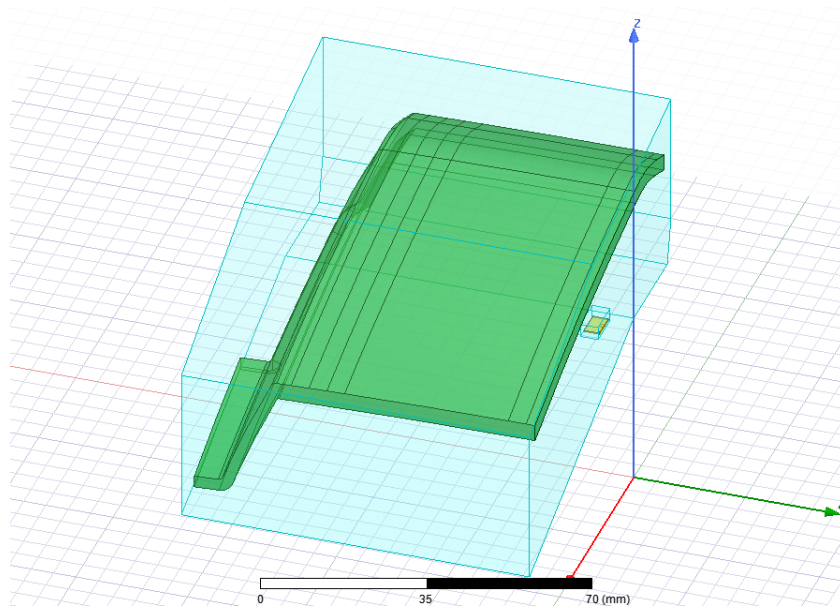


Figura 45: Diseño parachoques ABS, dividido simétricamente por su eje X.

Tras dividir el esquemático según el plano XZ y eliminar los bordes del parachoques de ABS, el problema a resolver queda de la siguiente manera:

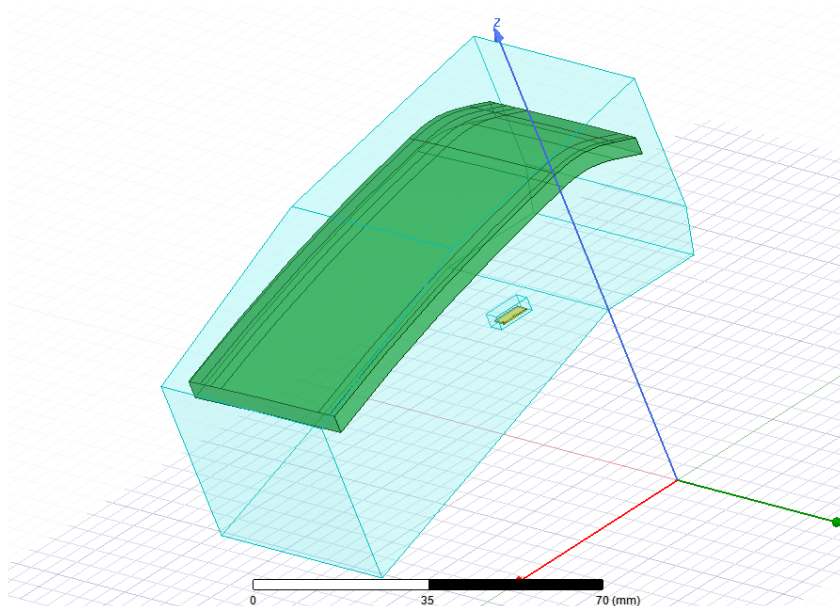


Figura 46: Diseño parachoques ABS, dividido según su plano X, eliminando los bordes laterales

Cabe resaltar que en este apartado tan sólo se van a presentar los resultados y comentar acerca de ellos, pero será en el apartado 6 (conclusiones) en el cual se compararán las diferentes resoluciones de los esquemas realizadas.

5.2.- Simulación

El primer paso antes de realizar la simulación es determinar la distancia a la cual se debe colocar el modelo del parachoques de la antena diseñada en el apartado 3. Para ello y teniendo en cuenta la figura 18 y la figura 43, se concluye que la distancia óptima para tener las mínimas pérdidas posibles (independientemente del grosor) es 10 mm. También se puede observar que la peor distancia de separación está en torno a los 15 mm.

A la vista de estos datos, se decide realizar 3 simulaciones distintas-

- La primera (figura 47 distancia 15mm) va a estar separada a una distancia de 15 mm, en pos de comprobar si realmente presenta una peor respuesta que la segunda.
- La segunda (figura 48, distancia 10mm) va a estar separada a tan solo 10 mm, que como se acaba de mencionar es aproximadamente el punto óptimo de separación entre antena y dieléctrico (ABS).
- Y la tercera (también figura 48), la diferencia que presenta con respecto a la anterior es que se considera un plano de masa infinito. Esta consideración es posible gracias a un parámetro del simulador que emula una longitud infinita (con respecto al tamaño del esquemático) del plano de masa.

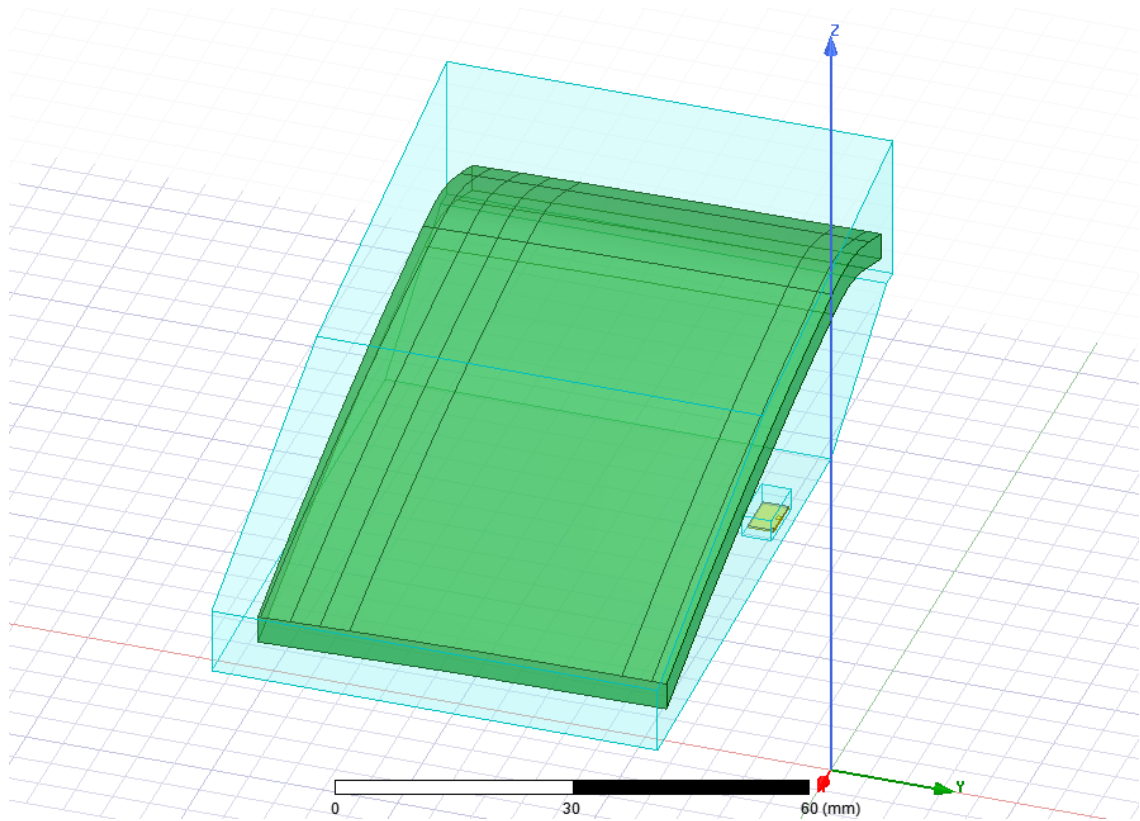


Figura 47: Parachoques a distancia de 15mm de la antena.

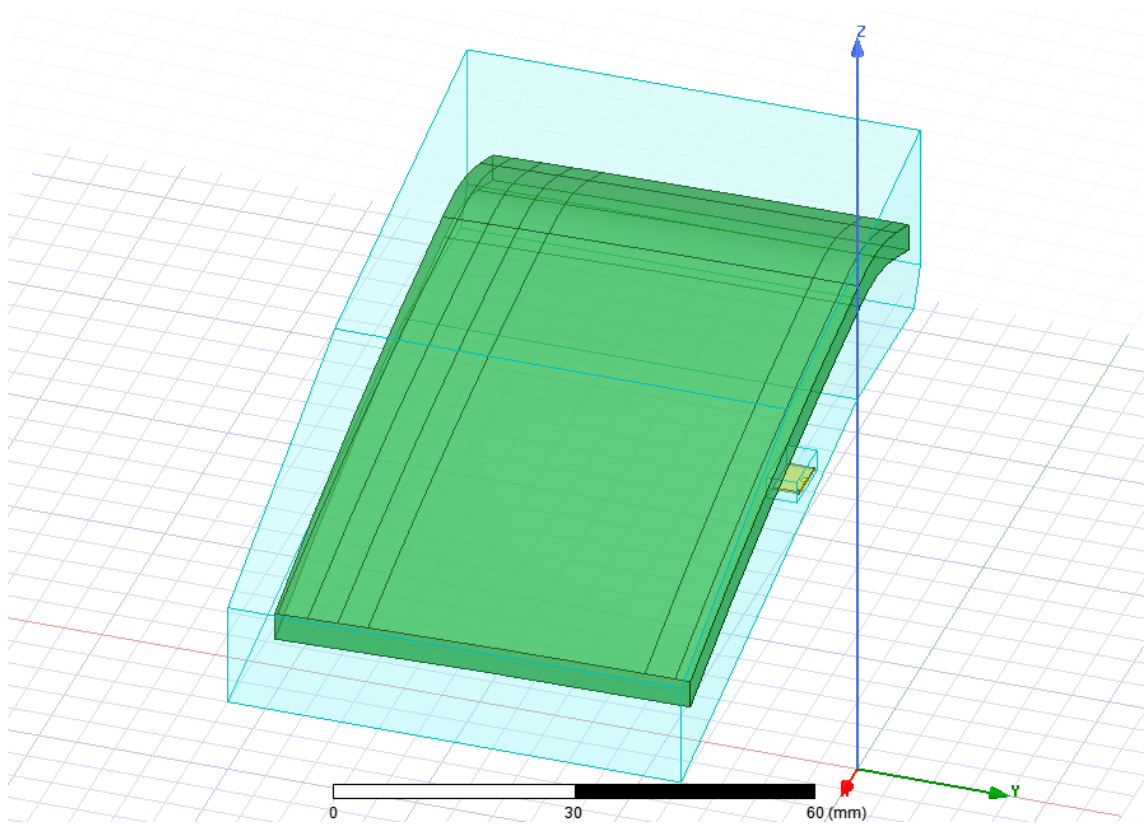


Figura 48: Parachoques a distancia de 10 mm de la antena.

5.2.1.- Simulación a 15mm

En esta primera simulación, al ser mayor la distancia entre el dieléctrico y la antena, el número de iteraciones que ha calculado HFSS antes de exceder su tamaño de memoria no ha llegado a resolver completamente el problema. Aún y todo, sin llegar a cumplir los parámetros especificados para la resolución (apartado 2), se considerará válido el resultado obtenido.

En el diagrama de radiación del modelo resuelto (figura 49), se aprecia que sí presenta simetría con respecto a su plano H (figura 50). Esta simetría era esperable debido al diseño del parche, como ya se mencionó en el apartado 3, y es dicha simetría la que permite la división de modelo según si eje X.

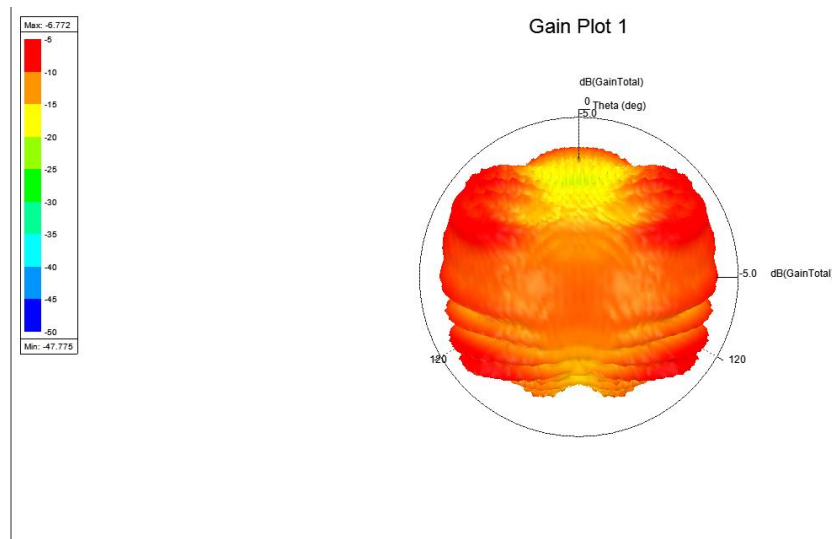


Figura 49: Diagrama de radiación, con distancia entre el parchoques y la antena de 15 mm.

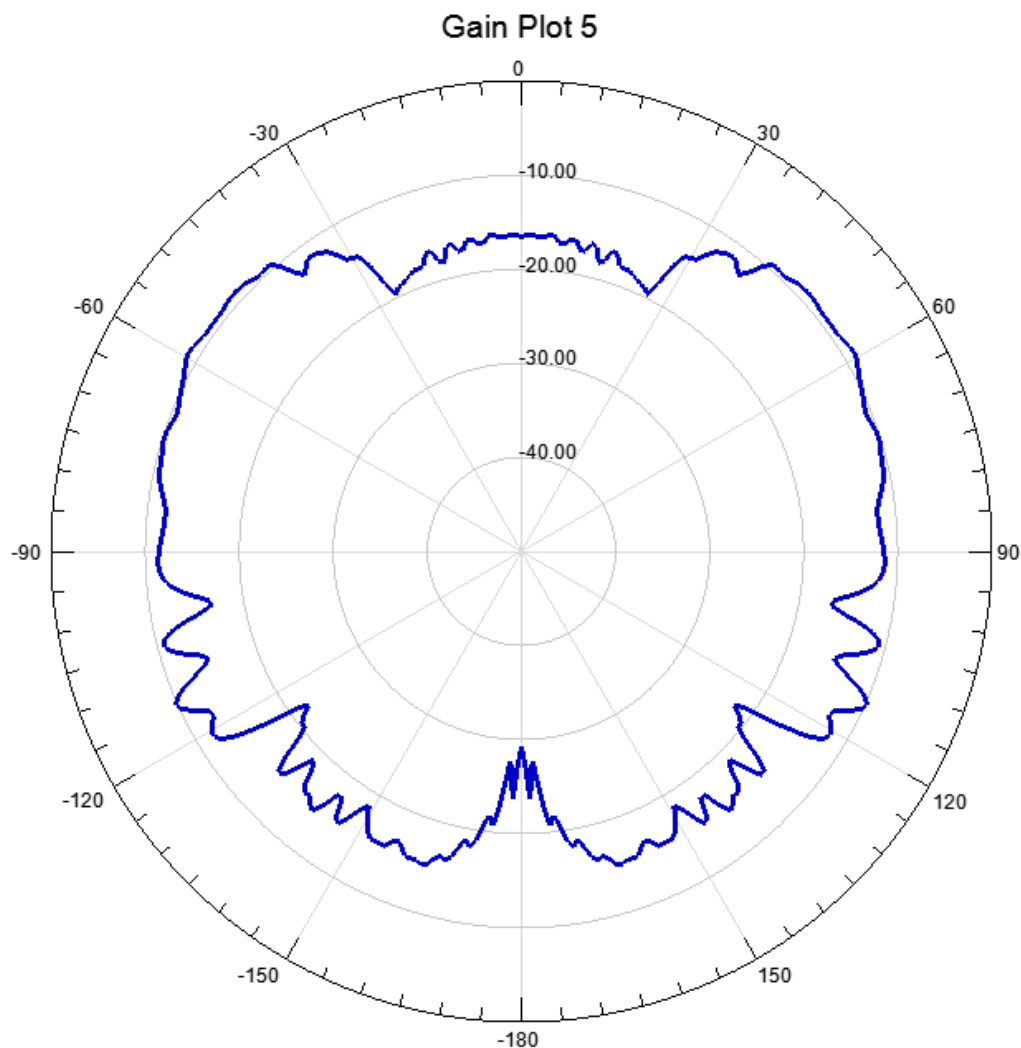


Figura 50. Corte plano H, con distancia entre el parachoques y la antena de 15 mm.

Con respecto al plano E (figura 51), se nota su mayor asimetría en torno a $\theta = 20^\circ$, mientras que en $\theta = -20^\circ$ tiene 10 veces más potencia (10dB más). Esto es probablemente debido la forma del parachoques y la colocación de la antena (figura 27), ya que en torno a $\theta = 20^\circ$, el parachoques está a diferente distancia que a $\theta = -20^\circ$. Por último, cabe resaltar que los lóbulos traseros son desmesuradamente grandes para lo que se estimaba, pero esto puede deberse también a reflexiones (que se evitarían con un plano de masa de mayores dimensiones).

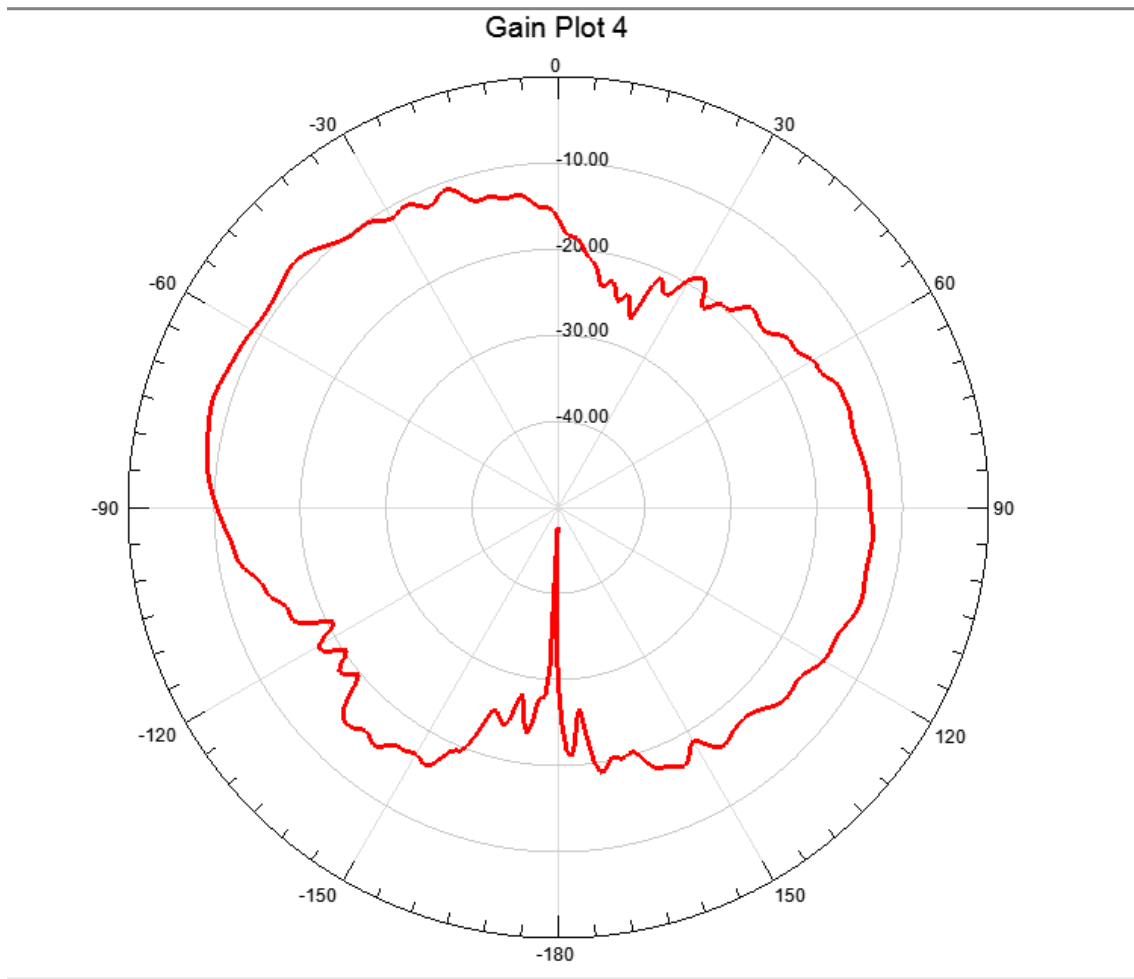


Figura 51: Corte plano E, , con distancia entre el parachoques y la antena de 15 mm.

5.2.2.- Simulación a 10mm

En esta segunda simulación, al contrario que en la anterior sí se ha podido resolver el problema con forme a los parámetros definidos en el apartado 2. Esto se debe a que, al estar la antena más próxima el dieléctrico, se ha procedido a reducir las dimensiones del aire que rodea a todos los elementos. Esto ha quitado la suficiente carga computacional al modelo como para que fuera completamente resuelto.

En el diagrama de radiación del modelo (figura 52), se aprecia que sí presenta simetría con respecto a su plano H (figura 53), como ocurría con una separación de 15mm.

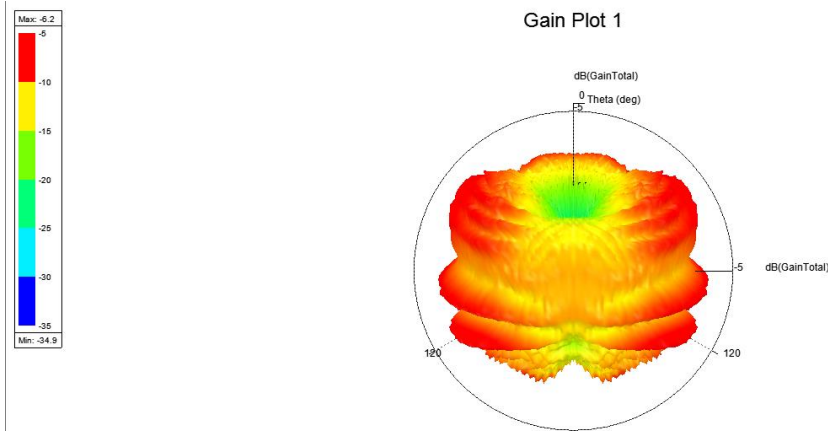


Figura 52: Diagrama de radiación, con distancia entre el parachoques y la antena de 10 mm.

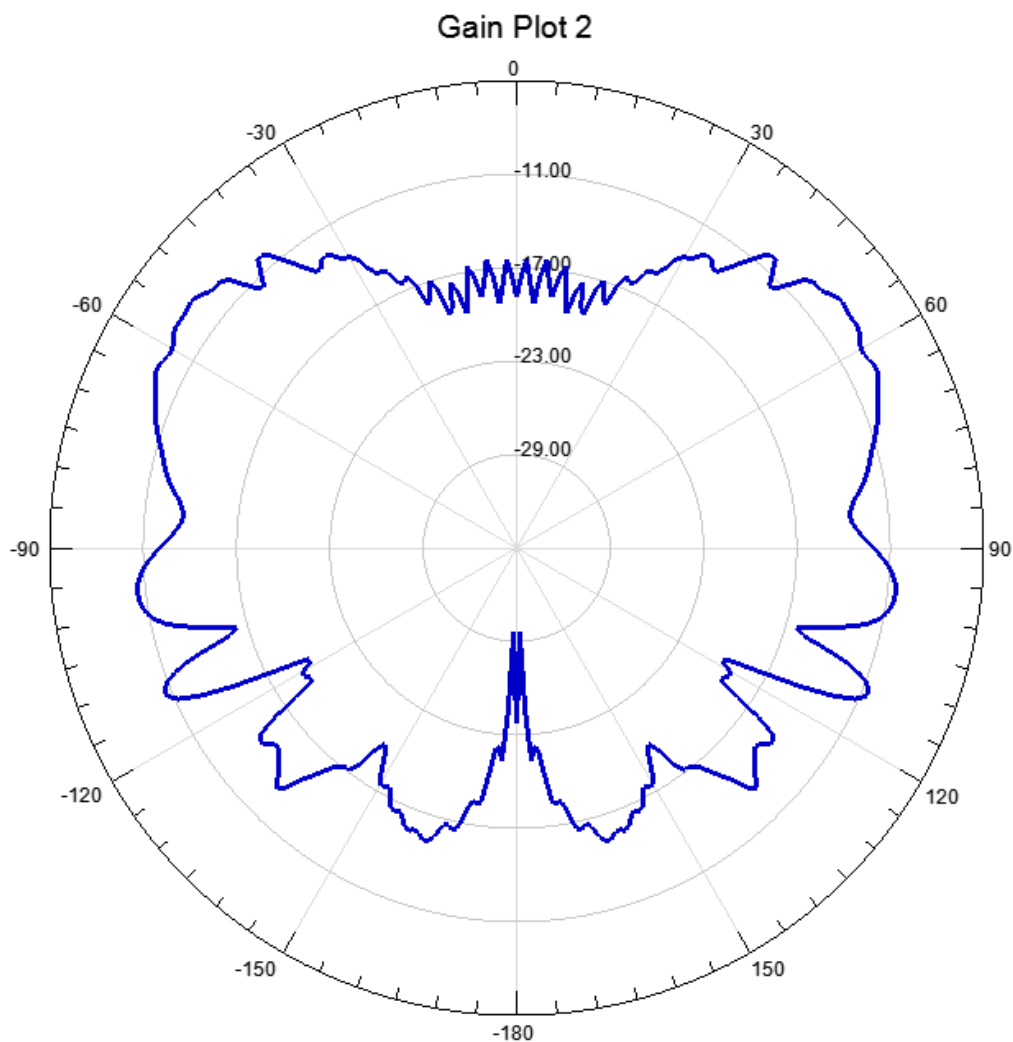


Figura 53: Corte plano H, con distancia entre el parachoques y la antena de 10 mm.

En lo que al plano E concierne (figura 54), se aprecia el mismo comportamiento dependiente con θ que se observaba en el subapartado anterior, pero aún más marcado si cabe, siendo la potencia aproximadamente 30 veces mayor (diferencia de unos 15dB entre $\theta = 20^\circ$ y $\theta = -20^\circ$). En contraposición, parece que se ha mejorado su respuesta con ángulos $\theta < 90^\circ$. Esto se verá en más detalle en el apartado siguiente (conclusiones).

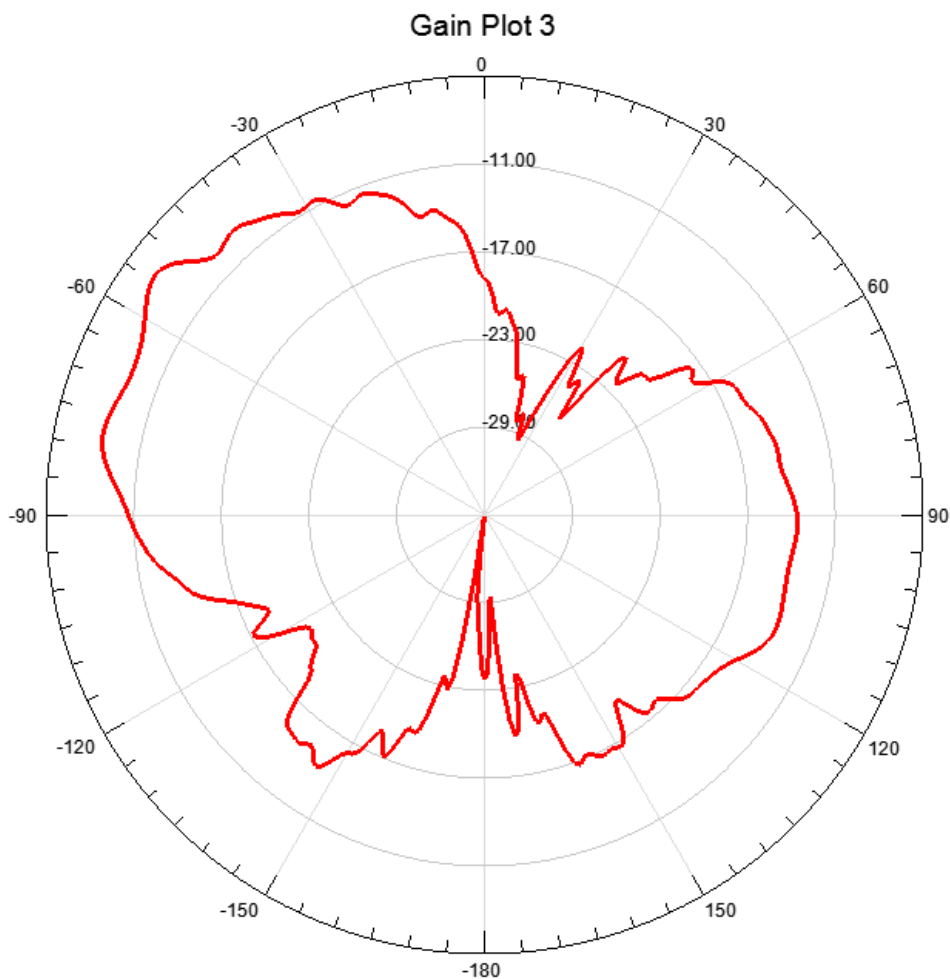


Figura 54: . Corte plano E, con distancia entre el parachoques y la antena de 10 mm.

5.2.3.- Simulación a 10mm con plano de masa infinito

Esta última simulación realizada es aquella que trata de ser más realista con el modelo a tratar. Este realismo viene determinado por varios factores, como son un parachoques con formas irregulares (lo que no se poseía en el apartado 4), sumado a un plano de masa infinito (el cual no estaba presente en otras simulaciones de este apartado). El plano de masa obviamente no es infinito, pero sí lo suficientemente grande como para que en términos generales de λ (longitud de onda) se considere infinito. Esto

intenta emular los componentes metálicos del vehículo, como puede ser el motor, que se situarían detrás de la antena.

El diagrama de radiación obtenido (figura 55), presenta una forma un tanto insólita, mas no del todo inesperada. Esta forma con un corte tan marcado en $\theta = 90^\circ$, se debe al plano de masa de longitud infinita. Por otro lado, la radiación hacia atrás ($\theta > 90^\circ$), se debe a diversas pérdidas. Aún con esta peculiar forma, el plano H obviamente sigue manteniendo su simetría (figura 56).

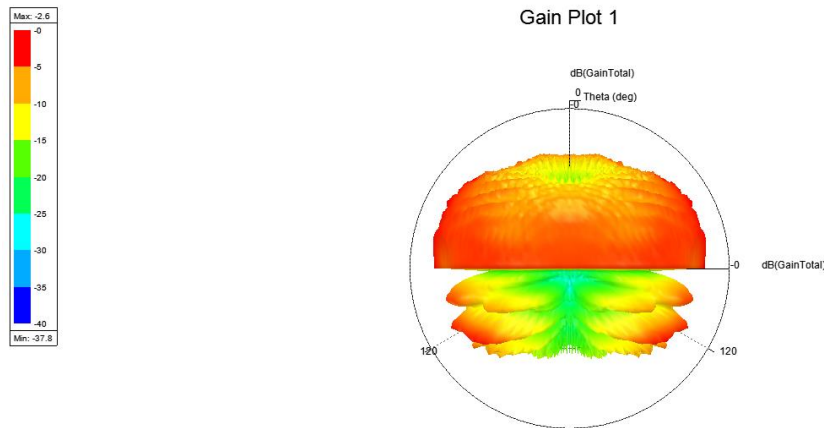


Figura 55: Diagrama de radiación de la antena, con distancia entre el parachoques y la antena de 10 mm y plano de masa infinito.

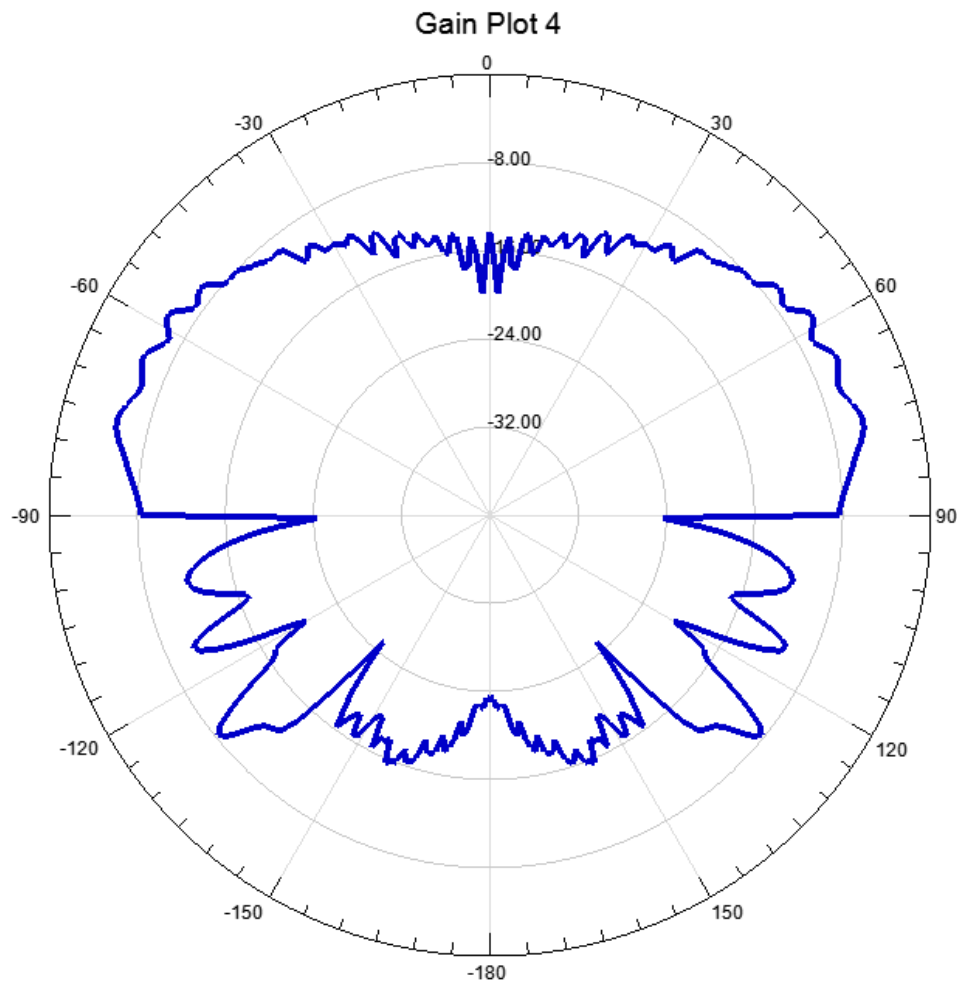


Figura 56: Corte plano H, con distancia entre el parachoques y la antena de 10 mm y plano de masa infinito.

Con respecto al corte plano E (figura 57), se aprecia la acción del plano de masa infinito de una forma más visual que en el diagrama de radiación (figura 55). El problema mencionado en las otras dos simulaciones de este mismo apartado en torno a $\theta = 20^\circ$, se ha desplazado a $\theta = 10^\circ$ para esta resolución. A parte se puede notar de una forma bastante clara que los lóbulos $\theta > 90^\circ$, tienen una aportación mínima, con unas potencias siempre menores a -16dB.

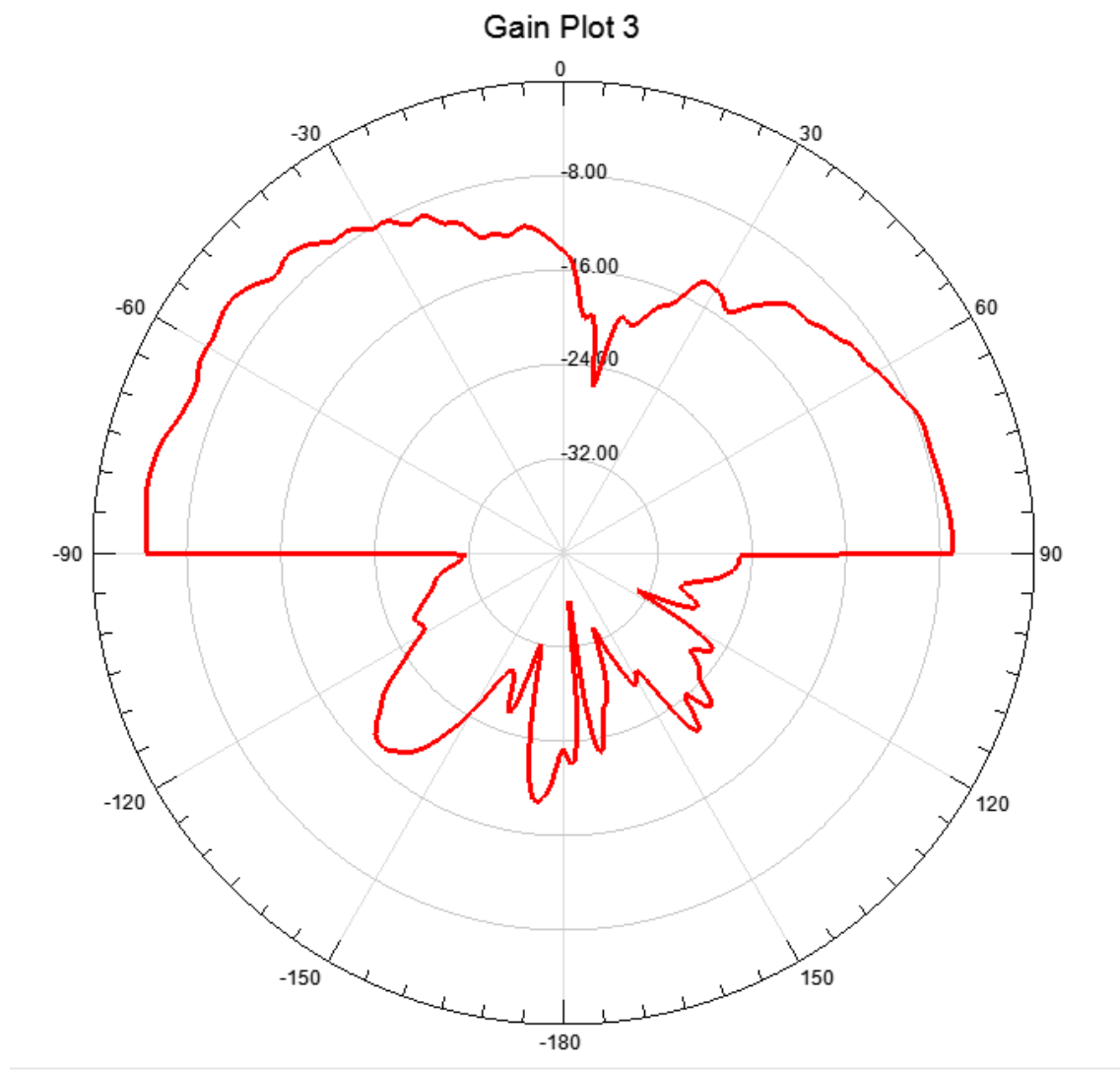


Figura 57: Corte plano E, con distancia entre el parachoques y la antena de 10 mm y plano de masa infinito.

5.3.- Conclusiones

En el presente apartado se van a realizar las pertinentes comparaciones entre los modelos analizados en el apartado 5, para lograr obtener de manera clara algún tipo de conclusión.

En primer lugar, se van a comparar los diagramas de radiación de los tres, seguidos de el corte plano H, y en última instancia el corte plano E.

5.3.1.- Diagramas de radiación obtenidos

En la figura 58, se pueden ver de una forma bastante visual los tres diagramas de radiación diferentes, siendo el de más arriba el correspondiente a una distancia de 15mm entre el dieléctrico y la antena, el del medio 10mm y el de más abajo, 10mm pero en presencia de un plano de masa infinito.

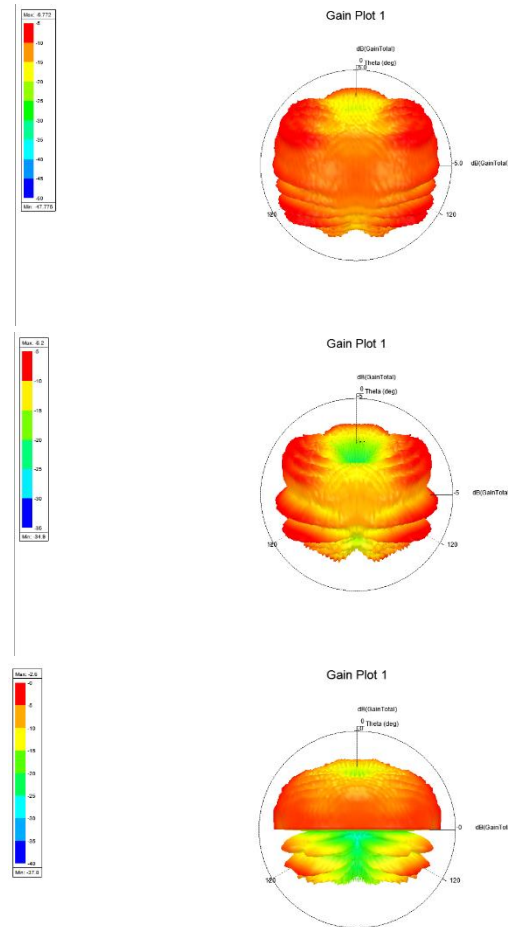


Figura 58: Diagramas de radiación con distancias entre parachoques y antena de 15 mm (arriba), 10 mm (centro) y 10 mm y plano de masa infinito (abajo).

La conclusión más obvia, es que a la vista de estos diagramas hay menos pérdidas hacia atrás conforme se mejora el modelo. Es decir, a 15mm hay más pérdidas que a 10mm, y a su vez, a 10mm hay más pérdidas que a 10mm en presencia de un plano de masa infinito (teniendo en cuenta que esto significa que sus dimensiones son $\gg \lambda$).

Entrando en materia de una forma más precisa, se aprecia que el máximo del diagrama de radiación del diagrama de más arriba (15mm), es de tan solo -6.7dB. En cambio, en el segundo diagrama (10mm con el plano de masa normal), se mejora 0.5dB

la respuesta, teniendo el máximo en -6.2dB. Para concluir con este subapartado, se debe resaltar que en presencia de un plano de masa infinito y una separación entre antena y dieléctrico de 10mm, el máximo del diagrama de radiación se encuentra en -2.6dB. Esto quiere decir que entre el primer diagrama de radiación de la figura 58 y el último, hay una mejora de 3.6dB, lo que corresponde a 2.29 veces más potencia.

5.3.2.- Plano E

En este subapartado se van a comparar, de una forma aproximada y visual, las diferencias entre los cortes plano E (correspondientes al plano XZ) de los diferentes modelos del apartado 5. En la figura 59, se observa en primer lugar el corte plano E del diseño en el cual la antena se encuentra a 15mm del dieléctrico. En segundo lugar, justo debajo de este, se encuentra el corte plano E correspondiente al diseño en el cual la distancia entre el parachoques y el parche es 10mm. Por último, se observa en la parte inferior de la figura 59 el corte plano E del mismo esquemático anterior (10mm), pero en presencia de un plano de masa infinito (dimensiones del plano $\gg \lambda$).

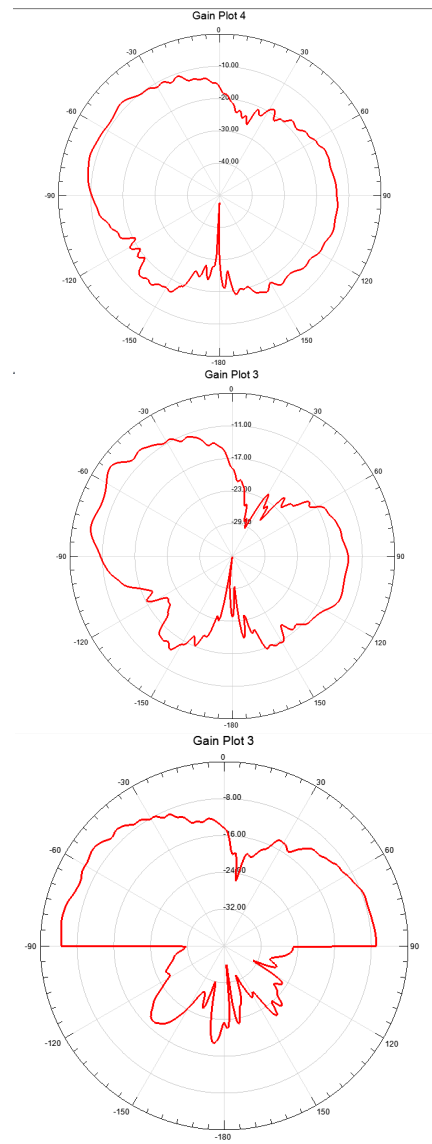


Figura 59: Corte plano E con distancias entre parachoques y antena de 15 mm (arriba), 10 mm (centro) y 10 mm y plano de masa infinito (abajo).

Las formas para $\theta < 90^\circ$ se puede explicar debido a las asimetrías del material (parachoques) presentes. En las figuras 47 y 48 se observaba que, sobre el plano XZ (corte plano E), conforme θ variaba hacia valores negativos o positivos no presentaba simetría. Esto se traduce en un diagrama asimétrico en θ .

La forma del diagrama de radiación de más abajo (distancia de 10mm y plano de masa infinito), se debe a que la potencia que se radia con $\theta > 90^\circ$, sufre una reflexión debida al plano de masa.

En cuanto a valores de estos diagramas se refiere, se puede ver que si bien es cierto que la simulación del primero (15mm) no se realizó completamente como se ha

mencionado en el apartado 5, al aumentar la separación se empeora la forma del diagrama de radiación para $\theta > 90^\circ$ (que no la magnitud), pero empeorando los lóbulos para $\theta < 90^\circ$. En cuanto a magnitudes se refiere (siempre hablando de $\theta < 90^\circ$), la diferencia entre máximos y mínimos se encuentra en torno a 20dB para todos los casos. Si acaso, cabe resaltar que el mínimo se encuentra en los dos primeros casos en torno a $\theta = 25^\circ$, pero en el último (plano de masa infinito) se encuentra en $\theta = 10^\circ$.

5.3.3.- Plano H

Los cortes plano H de estos tres modelos ya presentados previamente, no son tan interesantes desde un punto de vista conclusiones como pueden ser los cortes plano E o los diagramas de radiación 3D. Sin embargo, cabe resaltar que su perfecta simetría. Esto se debe a que, como ya se mencionó al principio del trabajo, al dividir en 2 mitades el problema con respecto al plano YZ (plano H), HFSS resolvería tan solo la mitad del problema y estimaría que los puntos simétricos son idénticos.

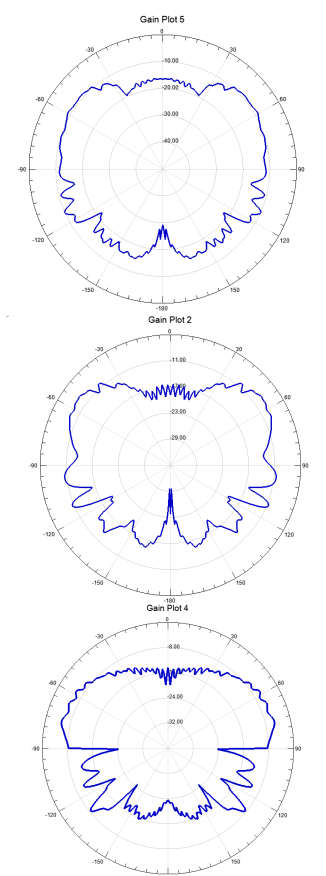


Figura 60: Cortes plano H con distancias entre parachoques y antena de 15 mm (arriba), 10 mm (centro) y 10 mm y plano de masa infinito (abajo).

6.- Conclusión

Este apartado va a tratar brevemente las conclusiones de más relevancia sacadas a partir de las simulaciones realizadas en apartados previos. Los datos que mayor relevancia aportan a este apartado son los diagramas de radiación y los cortes plano E (puesto que los cortes plano H son simétricos). De esta manera se ha decidido estructurar las conclusiones en base a estos dos criterios, y a la diferencia proveniente de tener un plano de masa normal o infinito.

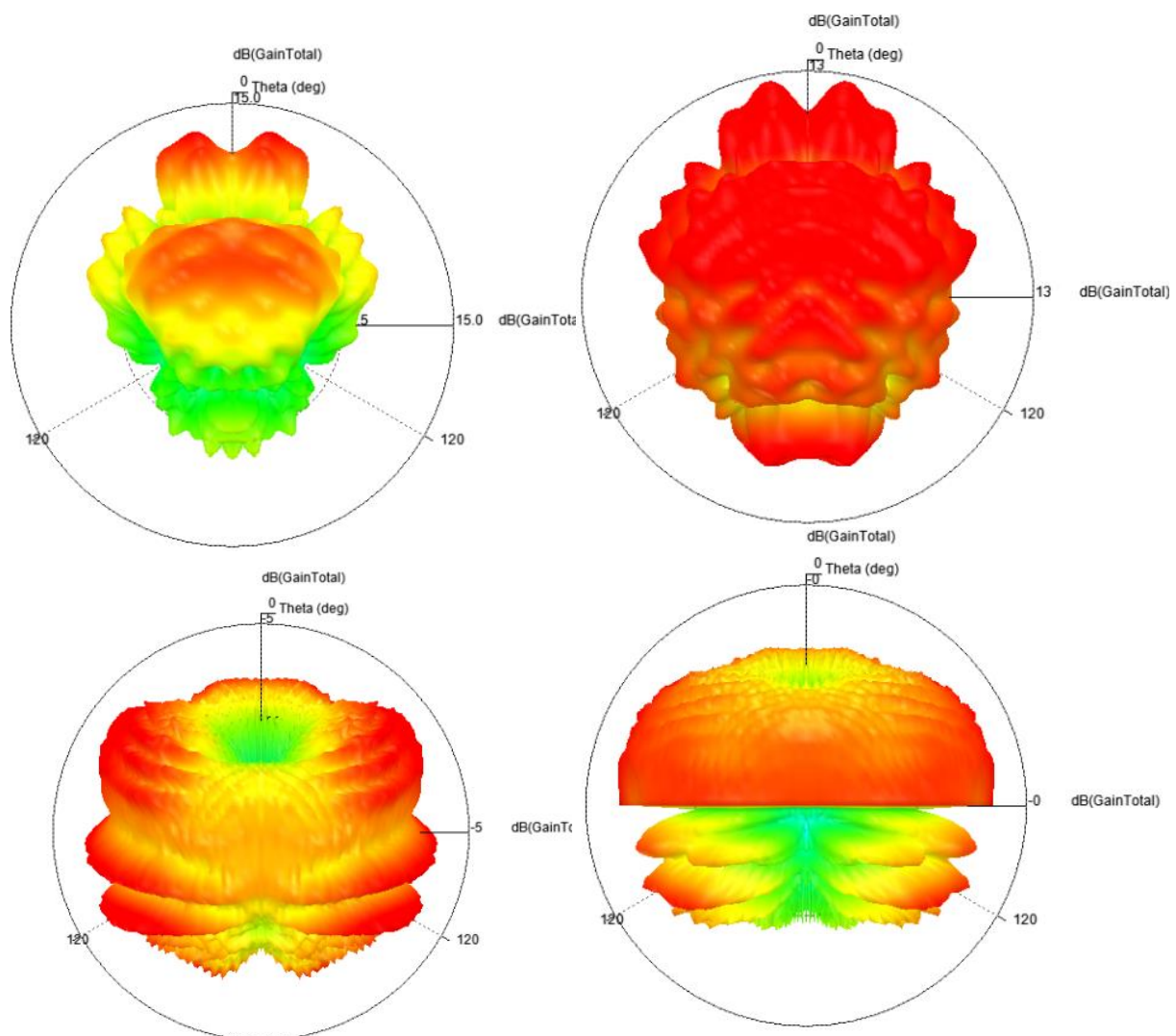


Figura 61: Diferentes diagramas de radiación, todos son separación entre el dieléctrico (plancha ABS de 4mm arriba y parachoques abajo) de 10mm. El diagrama de arriba a la derecha presenta plano de masa mucho mayor que la longitud de onda, y el de abajo a la derecha infinito.

Para que la comparación entre estos diagramas (figura 61) tenga validez, en todos ellos la distancia entre el dieléctrico y la antena es de 10mm. En los dos de diagramas de arriba el dieléctrico es una plancha de 4mm de espesor de ABS, mientras que en los dos de abajo se trata de un parachoques del mismo material. Antes de ahondar más en estos diagramas cabe resaltar que el diagrama de arriba a la derecha está calculado en presencia de un plano de masa de dimensiones mucho mayores a la longitud de onda, y el de abajo a la derecha en presencia de un plano de masa infinito. La diferencia entre ambos radica en que, al ser un diagrama infinito y el otro no, tan solo el infinito consigue que la reflexión producida por el mismo plano se aprecie a simple vista en el diagrama en $\theta = \pm 90^\circ$.

Puesto que el dieléctrico utilizado en los dos diagramas inferiores de la figura 61 presenta una geometría distinta al dieléctrico utilizado en los diagramas superiores, no tiene sentido referirse a la diferencia entre la forma del diagrama de radiación. Aún con esto, si da lugar a mencionar las amplitudes de estos diagramas:

- -11.8 dB el diagrama de arriba a la izquierda (4 mm de ABS)
- -10.7 dB el diagrama de arriba a la derecha (4 mm de espesor y plano de masa mayor al anterior).
- -6.2 dB el diagrama de abajo a la izquierda (parachoques de ABS).
- -2.6 dB el diagrama de abajo a la derecha (parachoques de ABS en presencia de un plano de masa infinito).

A la vista de estas amplitudes se puede asegurar que, en presencia de un plano de masa mayor, manteniendo las mismas condiciones del resto del escenario, hay una mayor ganancia.

En base al segundo criterio antes mencionado según el cual se van a comparar los resultados obtenido es el corte plano E del diagrama de radiación (figura 62).

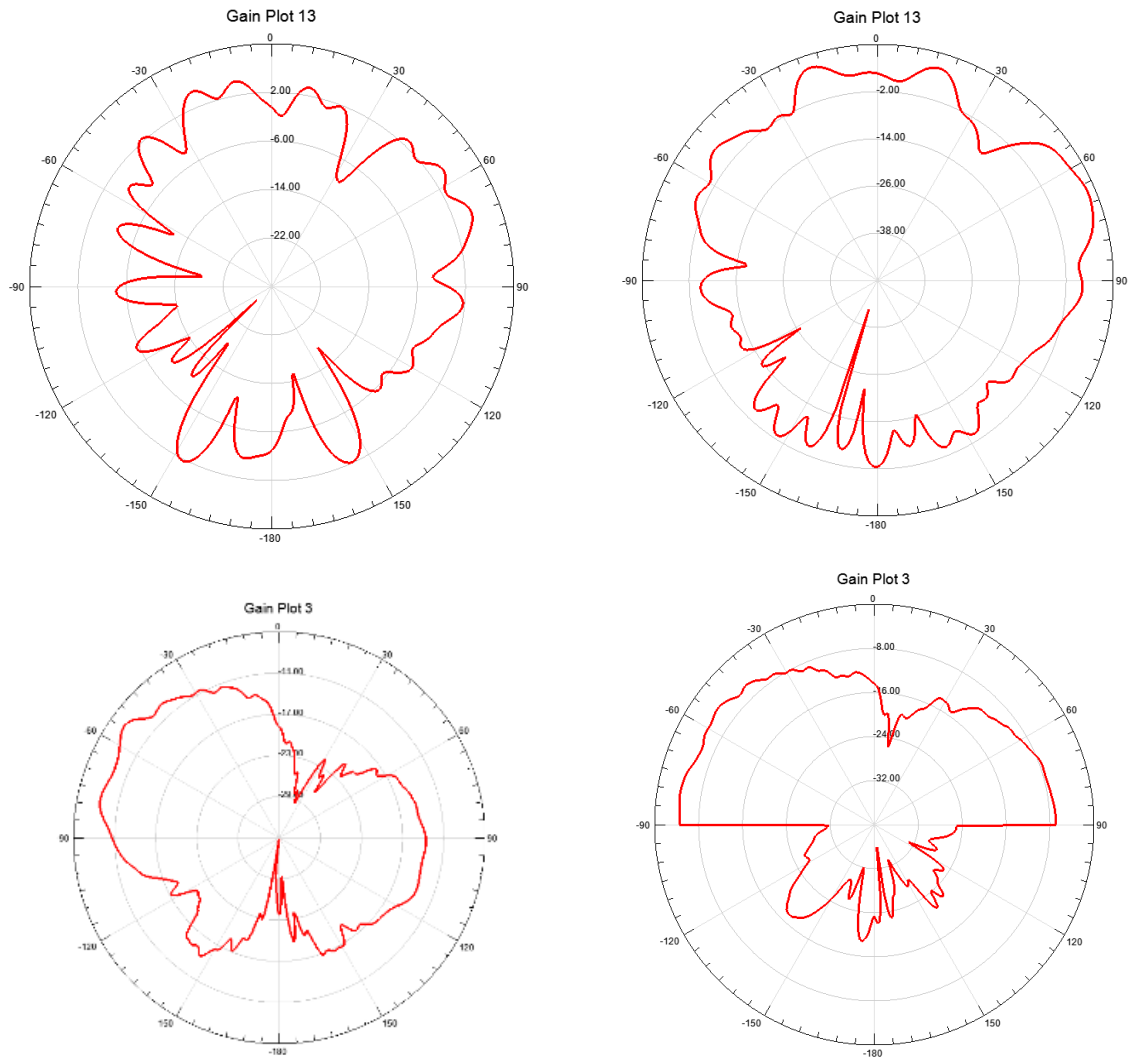


Figura 62: Diferentes cortes plano E ($\phi = 0^\circ$) diagramas de radiación, todos son separación entre el dieléctrico (plancha ABS de 4mm arriba y parachoques abajo) de 10mm. El diagrama de arriba a la derecha presenta plano de masa mucho mayor que la longitud de onda, y el de abajo a la derecha infinito.

En esta figura se aprecia la asimetría en $90^\circ > \theta > -90^\circ$ que presentan claramente los dos cortes inferiores, debido a la diferente distancia a la que se encuentra el parachoques en esos ángulos (figura 48). En cuanto a las amplitudes o las formas, se puede reducir a lo ya explicado en relación a la figura 61.

Por último, se muestra la representación de los cortes plano H (figura 63), de los mismos modelos mencionados anteriormente (distancia de 10 mm entre dieléctrico y antena, siendo el dieléctrico una plancha de ABS de espesor de 4 mm en los dos cortes superiores, y un parachoques de ABS en los dos inferiores). Lo único realmente relevante de estos planos que no se haya abarcado en los diagramas de radiación es su simetría. Esta simetría, como ya se ha mencionado en los diversos subapartados de conclusiones de los apartados previos viene dada por la geometría de la antena.

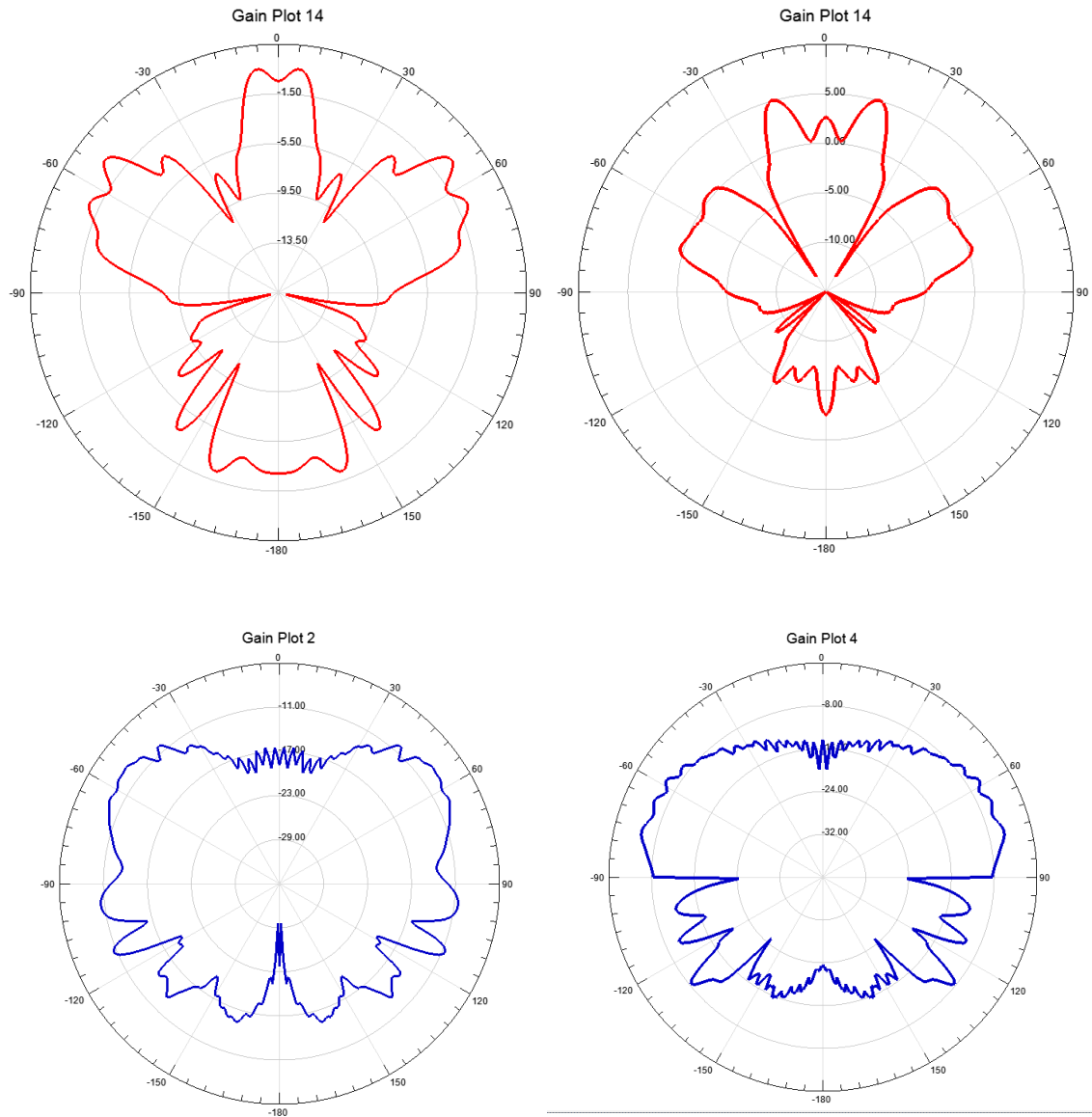


Figura 63 Diferentes cortes plano H ($\phi = 90^\circ$) diagramas de radiación, todos son separación entre el dieléctrico (plancha ABS de 4mm arriba y parachoques abajo) de 10mm. El diagrama de arriba a la derecha presenta plano de masa mucho mayor que la longitud de onda, y el de abajo a la derecha infinito.

7.- Líneas futuras

El trabajo realizado no es lo suficientemente extenso como para abarcar la totalidad del desarrollo de la antena presentada, pero es suficientemente amplio como para permitir una buena base de partida.

En primer lugar, como se ha demostrado ya en el trabajo, la distancia óptima es en torno a los 10mm. Por ello, sería necesaria alguna prueba más en torno a dicha distancia para comprobar su correcto funcionamiento. Una vez hecho alguna prueba más, llegaría el momento de comprobar su funcionamiento con situaciones más realistas. Una de ellas sería el ajuste de la orientación del parche en función de cómo se colocaría dentro del vehículo. Otra situación más realista a tener en cuenta sería la prueba de crear un array de antenas en vez de un solo parche.

Tras estos procesos de simulación, ya llegaría el momento de realizar de forma física la antena diseñada. Idealmente este proceso se realizaría en la misma universidad, pero es posible enviar a un tercero las características del diseño de la antena.

Posteriormente y con la antena ya fabricada, tan solo quedaría comprobar su correcto funcionamiento. Así se validaría el modelo del sustrato, sus pérdidas, diagrama de radiación y demás parámetros. Para ello se introduciría en una cámara anecoica sin presencia de ningún tipo de dieléctrico, y a continuación en presencia de dieléctricos previamente probados en la parte de simulación.

Anexos

Anexo1. Código MATLAB

```

1  %% Cálculo aprox. Antena Parche
2  clear all;
3  Rin = 100.6183; % Resistencia de la línea ms
4  freq = 77*10^9; % Frecuencia
5  er = 3.66;      % Constante dieléctrica
6  h = 0.254;      % Altura sustrato
7  c = 3*10^8;     % Vel de la luz
8
9  Wpatch = (c/(2*freq))*sqrt(2/(er+1))*1000; % Anchura del parche (mm)
10 ereff = ((er+1)/2)+(((er-1)/2)*(1/(sqrt(1+((12*h)/Wpatch)))));
11 DeltaL = ((0.412*h)*((ereff+0.3)*((Wpatch/h)+0.264)))/((ereff-0.258)*((Wpatch/h)+0.8)); % mm
12 Lpatch = (c*1000)/(2*freq*sqrt(ereff))-2*DeltaL; % Largo del parche (mm)
13 Redge = 90*((er^2)/(er-1))*((Lpatch/Wpatch)^2); % Res borde del parche
14 d = (Lpatch*acos(sqrt(Rin/Redge)))/pi; % Receso en mm
15
16 %% Calculo del receso a partir de la L
17 dl = (3.9807*acos(sqrt(Rin/Redge)))/pi;

```

Anexo2. Datasheet RO4353B

Property	Typical Value		Direction	Units	Condition	Test Method
	RO4003C	RO4350B				
Dielectric Constant, ϵ_r , Process	3.38 \pm 0.05	(1) 3.48 \pm 0.05	Z	--	10 GHz/23°C	IPC-TM-650 2.5.5.5 Clamped Stripline
(2) Dielectric Constant, ϵ_r , Design	3.55	3.66	Z	--	8 to 40 GHz	Differential Phase Length Method
Dissipation Factor tan, δ	0.0027 0.0021	0.0037 0.0031	Z	--	10 GHz/23°C 2.5 GHz/23°C	IPC-TM-650 2.5.5.5
Thermal Coefficient of ϵ_r	+40	+50	Z	ppm/°C	-50°C to 150°C	IPC-TM-650 2.5.5.5
Volume Resistivity	1.7 X 10 ¹⁰	1.2 X 10 ¹⁰		M Ω •cm	COND A	IPC-TM-650 2.5.17.1
Surface Resistivity	4.2 X 10 ⁹	5.7 X 10 ⁹		M Ω	COND A	IPC-TM-650 2.5.17.1
Electrical Strength	31.2 (780)	31.2 (780)	Z	KV/mm (V/mil)	0.51mm (0.020")	IPC-TM-650 2.5.6.2
Tensile Modulus	19,650 (2,850) 19,450 (2,821)	16,767 (2,432) 14,153, (2,053)	X Y	MPa (ksi)	RT	ASTM D638
Tensile Strength	139 (20.2) 100 (14.5)	203 (29.5) 130 (18.9)	X Y	MPa (ksi)	RT	ASTM D638
Flexural Strength	276 (40)	255 (37)		MPa (ksi)		IPC-TM-650 2.4.4
Dimensional Stability	<0.3	<0.5	X,Y	mm/m (mils/inch)	after etch +E2/150°C	IPC-TM-650 2.4.39A
Coefficient of Thermal Expansion	11 14 46	10 12 32	X Y Z	ppm/°C	-55 to 288°C	IPC-TM-650 2.4.41
Tg	>280	>280		°C TMA	A	IPC-TM-650 2.4.24.3
Td	425	390		°C TGA		ASTM D3850
Thermal Conductivity	0.71	0.69		W/m/°K	80°C	ASTM C518
Moisture Absorption	0.06	0.06		%	48 hrs immersion 0.060" sample Temperature 50°C	ASTM D570
Density	1.79	1.86		gm/cm ³	23°C	ASTM D792
Copper Peel Strength	1.05 (6.0)	0.88 (5.0)		N/mm (pli)	after solder float 1 oz. EDC Foil	IPC-TM-650 2.4.8
Flammability	N/A	(3) V-0				UL 94
Lead-Free Process Compatible	Yes	Yes				

Índice de Figuras y Tablas

Figura 1: Diversas geometías de antenas parche [4]	11
Figura 2: Alimentación mediante sonda coaxial [4].	12
Figura 3: Alimentación mediante línea microstrip [4].	12
Figura 4: Esquema de parche microstrip con receso (arriba (a)), e impedancia normalizada del parche en función de la posición (abajo (b)) [5].	13
Figura 5: Diseño de la antena parche en HFSS.	17
Figura 6: Respuesta en frecuencia del primer intento de adaptación de la antena a 77 GHz.	18
Figura 7: Barrido para diferentes valores del receso en busca de una buena adaptación a 77 GHz.	19
Figura 8: Respuesta de la antena a 77 GHz una vez ajustados el receso y la longitud del parche.	19
Figura 9: Diagrama de radiación de la antena a 77 GHz.	20
Figura 10: Diagrama de radiación de la antena a 77 GHz, visto el plano ϕ	20
Figura 11: Campos E y H producidos por la diferencia de potencial entre el parche y el plano de masa [7].	20
Figura 12: Diseño de la antena parche dividido el modelo según el eje X, en HFSS.	21
Figura 13: Respuesta de la antena a 77 GHz, según el modelo partido.	21
Figura 14: Antena junto a dieléctrico en HFSS.	22
Figura 15: Respresentación de la frecuencia a la cual se encuentran la mejor adaptación, en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, con espesor de 1mm.	24
Figura 16: Respresentación de la frecuencia a la cual se encuentran la mejor adaptación, en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, con espesor de 2mm.	26
Figura 17: Respresentación de la frecuencia a la cual se encuentran la mejor adaptación, en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, con espesor de 4mm.	26
Figura 18: Adaptación de la antena en función de diversas distancias y espesores del dieléctrico.	27
Figura 19: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 1 mm y distancia entre este y la antena de 10 mm.	28
Figura 20: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 2 mm y distancia entre este y la antena de 10 mm.	29
Figura 21: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 4 mm y distancia entre este y la antena de 10 mm.	30
Figura 22: Cortes plano E con separación entre parche ABS y antena de 10mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).	31
Figura 23: Cortes plano H con separación entre parche ABS y antena de 10mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).	31
Figura 24: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 1 mm y distancia entre este y la antena de 15 mm.	32
Figura 25: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 2 mm y distancia entre este y la antena de 15 mm.	33
Figura 26: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 4 mm y distancia entre este y la antena de 15 mm.	34
Figura 27: Cortes plano E con separación entre parche ABS y antena de 15mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).	35

Figura 28: Cortes plano H con separación entre parche ABS y antena de 15mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).	35
Figura 29: Diseño de la antena frente a plancha de ABS, en presencia de un plano de masa mayor.	36
Figura 30: Respresentación de la frecuencia a la cual se encuentran la mejor adaptación, en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, con espesor de 1mm.....	37
Figura 31: Respresentación de la frecuencia a la cual se encuentran la mejor adaptación, en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, con espesor de 4mm.....	38
Figura 32: Respresentación de la frecuencia a la cual se encuentran la mejor adaptación, en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, con espesor de 2mm.....	38
Figura 33: Adaptación de la antena en función de diversas distancias y espesores del dieléctrico.....	39
Figura 34: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 1 mm y distancia entre este y la antena de 10 mm.	40
Figura 35: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 2 mm y distancia entre este y la antena de 10 mm.	41
Figura 36: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 4 mm y distancia entre este y la antena de 10 mm.	42
Figura 37: Cortes plano E con separación entre parche ABS y antena de 10 mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).	43
Figura 38: Cortes plano H con separación entre parche ABS y antena de 10 mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).	43
Figura 39: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 1 mm y distancia entre este y la antena de 15 mm.	44
Figura 40: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 2 mm y distancia entre este y la antena de 15 mm.	45
Figura 41: Diagrama de radiación, con espesor del ABS de 4 mm y distancia entre este y la antena de 15 mm.	46
Figura 42: Cortes plano E con separación entre parche ABS y antena de 15 mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).	47
Figura 43: Cortes plano H con separación entre parche ABS y antena de 15 mm. Espesores de 1 mm (rojo), 2 mm (morado) y 4 mm (azul).	47
Figura 44: Diseño parachoques ABS.....	48
Figura 45: Diseño parachoques ABS, dividido simétricamente por su eje X.....	49
Figura 46: Diseño parachoques ABS, dividido según su plano X, eliminando los bordes laterales	49
Figura 47: Parachoques a distancia de 15mm de la antena.....	51
Figura 48: Parachoques a distancia de 10 mm de la antena.....	51
Figura 49: Diagrama de radiación, con distancia entre el parachoques y la antena de 15 mm.	52
Figura 50: Corte plano H, con distancia entre el parachoques y la antena de 15 mm.	53
Figura 51: Corte plano E, , con distancia entre el parachoques y la antena de 15 mm.	54
Figura 52: Diagrama de radiación, con distancia entre el parachoques y la antena de 10 mm.....	55
Figura 53: Corte plano H, con distancia entre el parachoques y la antena de 10 mm.	56
Figura 54: . Corte plano E, con distancia entre el parachoques y la antena de 10 mm.....	57
Figura 55: Diagrama de radiación de la antena, con distancia entre el parachoques y la antena de 10 mm y plano de masa infinito.....	58
Figura 56: Corte plano H, con distancia entre el parachoques y la antena de 10 mm y plano de masa infinito.....	59

Figura 57: Corte plano E, con distancia entre el parachoques y la antena de 10 mm y plano de masa infinito.....	60
Figura 58: Diagramas de radiación con distancias entre parachoques y antena de 15 mm (arriba), 10 mm (centro) y 10 mm y plano de masa infinito (abajo).....	61
Figura 59: Corte plano E con distancias entre parachoques y antena de 15 mm (arriba), 10 mm (centro) y 10 mm y plano de masa infinito (abajo).....	63
Figura 60: Cortes plano H con distancias entre parachoques y antena de 15 mm (arriba), 10 mm (centro) y 10 mm y plano de masa infinito (abajo).....	64
Figura 61: Diferentes diagramas de radiación, todos son separación entre el dieléctrico (plancha ABS de 4mm arriba y parachoques abajo) de 10mm. El diagrama de arriba a la derecha presenta plano de masa mucho mayor que la longitud de onda, y el de abajo a la derecha infinito.	65
Figura 62: Diferentes cortes plano E ($\phi = 0^\circ$) diagramas de radiación, todos son separación entre el dieléctrico (plancha ABS de 4mm arriba y parachoques abajo) de 10mm. El diagrama de arriba a la derecha presenta plano de masa mucho mayor que la longitud de onda, y el de abajo a la derecha infinito.....	67
Figura 63 Diferentes cortes plano H ($\phi = 90^\circ$) diagramas de radiación, todos son separación entre el dieléctrico (plancha ABS de 4mm arriba y parachoques abajo) de 10mm. El diagrama de arriba a la derecha presenta plano de masa mucho mayor que la longitud de onda, y el de abajo a la derecha infinito.....	68

Tabla 1: Frecuencia y máximo de los valores de adaptación de la antena en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, y el espesor de este.	25
Tabla 2: Frecuencia y máximo de los valores de adaptación de la antena en función de la distancia entre la antena y el dieléctrico, y el espesor de este.	37

Bibliografía

- [0] Ansys, Inc, 2019, [en línea]. Disponible en:
<https://www.ansys.com/es-es/products/electronics/ansys-hfss>
- [1] K. Solbach and R. Schneider, "Antenna Technology for Millimeter Wave Automotive Sensors," *1999 29th European Microwave Conference*, Munich, Germany, 1999, pp. 139-142. doi: 10.1109/EUMA.1999.338292
- [2] BOE, Parlamento Europeo Directiva 98/34/CE [En línea]. Disponible en:
<https://www.boe.es/doue/2015/333/L00120-00123.pdf>. [Accedido: 17-dic2015]
- [3] J. Howell, "Microstrip antennas," *1972 Antennas and Propagation Society International Symposium*, Williamsburg, VA, USA, 1972, pp. 177-180. doi: 10.1109/APS.1972.1146932
 Chuong Khong, "Designo of a Microstrip Patch Antenna".
- [4] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and design*. Wiley-Interscience, 2005.
- [5] Pozar, David M. *Microwave Engineering*. Hoboken. NJ: Wiley, 2012.
- [6] Chuong Khong, "Designo of a Microstrip Patch Antenna", Vietnam, Ho Chi Minh City University of Technology. Jun. 2006.
- [7] Rogers corp, "ROGERS CORPORATION", 2018, [en línea]. Disponible en:
<https://www.rogerscorp.com/acs/products/55/RO4350B-Laminates.aspx>